

Anwendbarkeit und Integration von bordseitigen Separationsverfahren für das Flugverkehrsmanagement im Flughafennahbereich

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexandra von Eckartsberg
aus Weilburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. U. Klingauf
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Boltze
Tag der Einreichung:	19.01.2014
Tag der mündlichen Prüfung:	29.04.2014

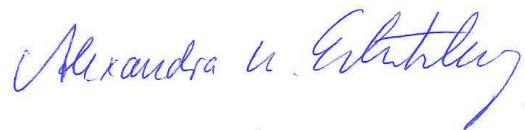
Darmstadt, 2015

D17

Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Brüssel, den 19.01.2014

A handwritten signature in blue ink, reading "Alexandra v. Eckartsberg". The signature is written in a cursive style with a large, flowing 'A' and a long, sweeping underline.

(Alexandra von Eckartsberg)

Dank

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kubbat, der mir mit meiner Anstellung am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU Darmstadt vor vielen Jahren den Weg zur Promotion bereitet hat.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf für seine geduldige Haltung und die Betreuung bei der Erstellung dieser Dissertation.

Meinen Eltern.

*„It has often proved true that the dream of yesterday
is the hope of today and the reality of tomorrow“*

Robert Goddard

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Das Luftverkehrssystem heute und morgen	5
2.1 Air Traffic Management	6
2.1.1 Airspace Management	6
2.1.2 Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM)	7
2.1.3 Air Traffic Control (ATC)	7
2.2 Herausforderungen für die Zukunft	8
2.3 Lösungsansätze	13
2.3.1 Harmonisierung von Forschung und Zielsetzungen	13
2.3.2 Operationelles Konzept	15
2.3.3 Technologie	18
2.4 SES und SESAR	20
3 ASAS im Kontext kooperativen Luftverkehrsmanagements	25
3.1 ASAS Definition und Kategorisierung	25
3.2 Erwarteter Nutzen	30
3.3 Stand der Forschung	32
3.4 Untersuchungsbedarf	41
4 Analyse anwendbarer Regelungsverfahren	45
4.1 Vorgegangene Untersuchungen	45
4.2 Untersuchungsbedarf	48
4.3 Regelungsverfahren	48
4.3.1 Constant Time Delay (CTD)	48

4.3.2	Modifiziertes Constant Time Delay (MCTD)	58
4.3.3	Constant Time Predict (CTP)	60
4.3.4	Predict Point (PP)	63
4.3.5	Predict Passed Point (PPP)	66
5	Verfahrenskonzepte für ASAS-Phasen bei verschiedenen Rahmenbedingungen	69
5.1	Unterteilung	70
5.2	Merging am Metering Fix	72
5.2.1	Rahmenbedingungen an der TMA-Grenze	72
5.2.2	Aktivierung	73
5.2.3	Regelungsverfahren	75
5.3	Intrail-Phasen	76
5.3.1	Aktivierung	76
5.3.2	Abbruch	79
5.3.3	Regelungsverfahren	79
5.4	Merging von Verkehrsströmen innerhalb der TMA	81
5.4.1	Targetwechsel	82
5.4.2	FALL I	84
5.4.3	FALL II	87
5.4.4	FALL III	88
5.4.5	FALL IV	89
5.4.6	FALL V	90
5.4.7	FALL VI	92
5.4.8	FALL VII	92
5.4.9	FALL VIII	93
5.4.10	FALL IX	94
5.4.11	Fall X	101
5.4.12	FALL XI	103
5.4.13	FALL XII	104
5.4.14	FALL XIII	106
5.5	Final Turn	107
5.5.1	Aktivierung	107
5.5.2	Regelungsverfahren	111

6	Simulation	115
6.1	Szenarienauswahl	115
6.2	Annahmen	118
6.2.1	Wind	118
6.2.2	Geschwindigkeitsregelung	118
6.2.3	Lfz-Muster und Daten	118
6.2.4	Anflugverfahren	119
6.2.5	Bewegungsgleichungen	119
6.3	Diskussion der Simulationsergebnisse	120
6.3.1	Merging am Metering Fix	120
6.3.2	Intrail-Phase	122
6.3.3	Merging bei Winkeln unter 90°	131
6.3.4	Merging bei Winkeln von 180°	132
7	Betriebskonzept	139
7.1	Ablauf aus Sicht eines Trailing Aircraft	139
7.2	Initialisierung	142
7.3	Planung	142
7.4	Rollen	143
7.4.1	Lotsen	143
7.4.2	Piloten	144
7.5	Spezielle Situationen	144
7.5.1	Betriebsrichtungswechsel	144
7.5.2	Missed Approach	145
7.5.3	Entfernen eines Lfz aus der Kette	145
7.5.4	Integration nichtausgerüsteter Lfz	145
8	Zusammenfassung und Ausblick	147
	Appendix	153
A	ASTERIX CAT 21 Daten	155
B	Stabilitätsanalyse	157
B.1	CTD und MCTD	157
B.2	CTP	165
C	Δv_{cmd} im PP Verfahren	171

D	Ableitung der Randbedingungen für das Merging mit Trackfächer	173
E	BADA Daten für Simulation	177
F	Flussdiagramme für den Gesamtablauf des ASAS Verfahrens	179
	Literaturverzeichnis	189

Abkürzungsverzeichnis

ADS-B	Automatic Dependend Surveillance Broadcast
ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
AMAN	Arrival Manager
AMSTAR	Airborne Merging and Spacing for Terminal Arrivals
AOP	Airport Operations Plan
AP	Arbeitspunkt
ARP	Airport Reference Point
AS	Airborne Surveillance
ASAS	Airborne Separation Assistance/Assurance Systems
ASEP	Airborne Separation Applications
ASPA	Airborne Spacing Applications
ATAAS	Advanced Terminal Area Approach System
ATSA	Airborne Traffic Situational Awareness Applications
ATC	Air Traffic Control
ATFCM	Air Traffic Flow and Capacity Management
ATM	Air Traffic Management
BADA	Base of Aircraft Data
C&P	Crossing and Passing
CARE	Cooperative Actions of R&D in Eurocontrol
CDM	Collaborative Decision Making
CDTI	Cockpit Display of Traffic Information
CENA	Centre d'Études de la Navigation Aérienne
CFMU	Central Flow Management Unit
CNS	Communication, Navigation, Surveillance
CTA	Controlled Time of Arrival
CTOT	Calculated Take-Off Time
CTD	Constant Time Delay
CTP	Constant Time Predict
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DPI	Departure Planning Information
E-OCVM	European Operational Concept Validation Methodology
EATCHIP	European Air Traffic Control Harmonisation and Integration Programme
ECAC	European Civil Aviation Conference
ETMA	Extended Terminal Manoeuvring Area

FAA	Federal Aviation Administration
FABEC	Functional Airspace Block Europe Central
FAF	Final Approach Fix
FASA	Final Approach Spacing Assistance
FCFS	First Come First Serve
FL	Flight Level
FMS	Flight Management System
FRA	Frankfurt Airport
FUA	Flexible Use of Airspace
FUM	Flight Update Message
GNSS	Global Navigation Satellite System
GS	Ground Speed
GS	Ground Surveillance
IAS	Indicated Air Speed
ICAO	International Civil Aviation Organization
ITP	In-Trail Procedures
Lfz	Luftfahrzeug
LOC	Line of Change
MAEVA	MASTER ATM European Validation Plan
MCTD	Modifiziertes Constant Time Delay
MDI	Minimum Departure Interval
MP	Mergepunkt
NOP	Network Operations Plan
NRA	Non Radar Airspace
PHARE	Programme for Harmonised ATM Research in Eurocontrol
PP	Predict Point
PPP	Predict Passed Point
OCD	Operational Concept Description
RFG	Requirements Focus Group
S&A	See and Avoid
S&M	Sequenceing and Merging
SES	Single European Sky
SESAR	Single European Sky ATM Research
STD	Standardtrajektorie
SWIM	System Wide Information Management
TCP	Trajectory Change Point
TMA	Terminal Manoeuvring Area
TTA	Target Time of Arrival
TTG	Time to Gain
TTL	Time to Lose
WOW	Weight on Wheels
xtd	Cross Track Distanz
xte	Cross Track Error

Symbolverzeichnis

A	Auftrieb
a_{tgt}	Beschleunigung des Target Aircraft
a_{trail}	Beschleunigung des Trailing Aircraft
c_a	Auftriebsbeiwert
c_w	Widerstandsbeiwert
c_{w0}	Widerstandsbeiwert bei Nullauftrieb
d	Distanz zwischen Target und Trailing Aircraft
d_{tgt}	Distanz des Target Aircraft zum Merging Point
d_{trail}	Distanz des Trailing Aircraft zum Merging Point
e_{dCTD}	distanzbasierter Fehler im CTD-Verfahren
e_{dCTP}	distanzbasierter Fehler im CTP-Verfahren
e_{PP}	Fehler im PP-Verfahren
e_{PPP}	Fehler im PPP-Verfahren
e_{tCTD}	zeitbasierter Fehler im CTD-Verfahren
e_{tCTP}	zeitbasierter Fehler im CTD-Verfahren
F	Schub
F_0	Schub im Arbeitspunkt
g	Erdbeschleunigung
G	Übertragungsfunktion
G_0	Übertragungsfunktion des offenen Kreises
k	Faktor des Auftriebswiderstandsbeiwertes
k_d	Verstärkungsfaktor des Differentialreglers
k_p	Verstärkungsfaktor des Proportionalreglers
K_V	Verstärkungsfaktor der Strecke „Luftfahrzeug“
m	Masse
r_k	Kurvenradius
r_{tgt}	zurückgelegte Strecke des Target Aircraft
r_{trail}	zurückgelegte Strecke des Trailing Aircraft
r_{soll}	Solldistanz zum Target Aircraft
s	Streckenabschnitt; Laplace Variable
S	Flügelfläche
s_k	Schaltabstand
t	Zeit
T_V	Zeitkonstante der Strecke „Luftfahrzeug“

v_{cmdCTD}	kommandierte Geschwindigkeit im CTD-Verfahren
v_{cmdCTP}	kommandierte Geschwindigkeit im CTP-Verfahren
$v_{cmdMCTD}$	kommandierte Geschwindigkeit im MCTD-Verfahren
v_{cmdPP}	kommandierte Geschwindigkeit im PP-Verfahren
v_{cmdPPP}	kommandierte Geschwindigkeit im PPP-Verfahren
V_k	Bahngeschwindigkeit
V_0	Bahngeschwindigkeit im Arbeitspunkt
v_{tgt}	Geschwindigkeit des Target Aircraft
v_{trail}	Geschwindigkeit des Trailing Aircraft
W	Widerstand
z	Variable der z-Transformation
α	Trackdifferenz aufeinanderfolgender Legs
α_{max}	maximal erlaubter Streuwinkel im Trackfächer
γ	Bahnwinkel
Δt_{calc}	Berechnungsintervall
Δt_{soll}	zeitlicher Sollabstand
$\dot{\chi}$	Giergeschwindigkeit
Π	Kreiszahl
ρ	Luftdichte
Φ	Hängewinkel
Ψ	zu linearisierende Funktion

Kapitel 1

Einleitung

Das stetig wachsende Bedürfnis der Weltbevölkerung nach Mobilität führt im Boden- wie im Luftverkehr zu einer immer größer werdenden Transportnachfrage. Auch wenn das Wachstum des Luftverkehrs in den letzten Jahren nicht so stark ausgefallen ist wie prognostiziert, muss auf lange Sicht doch mit einem kontinuierlichen Anstieg gerechnet werden.

Auf Basis heutiger Prozesse, Prozeduren und eingesetzter Technologie lässt sich kaum mehr eine weitere Steigerung der Kapazität des Luftverkehrssystems erreichen. Viele Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der vergangenen Jahre zielten deshalb darauf ab, die Kapazität zu erhöhen und in erster Linie den möglichen Durchsatz zu steigern, d.h. also die Anzahl der Bewegungen pro Zeiteinheit zu erhöhen.

Bei der Optimierung nach zeitlichen und damit wirtschaftlichen Gesichtspunkten steht jedoch stets die Sicherheit des Luftverkehrs im Vordergrund. Limitierende Faktoren bei der Steigerung der Kapazität sind hier die kognitive Kapazität des Lotsen einerseits und die erforderliche Einhaltung von Sicherheitsabständen andererseits.

Die Sicherheitsabstände selbst setzen sich wiederum aus drei Komponenten zusammen. Diese sind die physikalische Komponente durch die Einflüsse von Wirbelschleppen, die technologische Komponente aufgrund von Ortungsungenauigkeiten und wiederum eine menschliche Komponente durch das Risiko, das aus zeitkritischen Führungsanweisungen oder ungenauer Durchführung heraus entsteht.

Der Einfluss der Sicherheitsabstände auf die Kapazität ist insbesondere im Flughafennahbereich relevant, da sich hier die Zonen dichtesten Verkehrs befinden. Kapazitätssteigerungen im Enroute Bereich sind ineffektiv und rein virtuell, solange die Kapazität der Terminal Manoeuvring Area (TMA) nicht ebenfalls gesteigert werden kann. Aus diesem Grund steht der Flughafennahbereich in der vorliegenden Arbeit im Fokus besonderen Interesses.

Ein Ansatzpunkt zur Steigerung der Kapazität ist die Implementierung einer effizienteren Arbeitsteilung zwischen Lotse und Pilot durch Delegation der Separationsaufgabe und damit einhergehend die Entwicklung von Airborne Separation Assistance Systems (ASAS) Applikationen, die den Piloten dabei unterstützen, die an ihn delegierte Aufgabe auszuführen.

Die Anwendung von ASAS in der TMA steht in starker Wechselwirkung zum strategischen Routenführungskonzept als auch zum taktischen operationellen Konzept in der täglichen Ausführung.

In verschiedenen Projekten wurden Konzepte für die Bildung kürzerer Lfz-Ketten, die auf relativen Führungsanweisungen basieren, mittels Realzeitsimulationen unter Einbeziehung von Lotsen und Piloten untersucht. Die Ergebnisse bei der Anwendung innerhalb der TMA ergaben, dass der erwartete Rückgang an Führungsanweisungen durch einen hohen Kommunikationsaufwand und eine hohe Arbeitsbelastung bei der Herstellung und Auflösung von Lfz-Ketten wieder kompensiert wurde und somit kein Nutzen festzustellen war.

Die in der Vergangenheit erzielten Ergebnisse weisen darauf hin, dass der ausgebliebene positive Einfluss der Anwendung von ASAS in der TMA auf das Fehlen eines einheitlichen und durchgängigen Konzeptes zurückzuführen ist, das die Verkehrsströme innerhalb der TMA auf Basis der ASAS-Verfahren integriert. Ein solches Konzept führt unweigerlich zur Bildung langer Ketten von Lfz, die sich über die gesamte TMA erstrecken. Die Effekte zeitbasierter Abstandsregelung bei der Anwendung verschiedener Regelungsverfahren wurde für lange Ketten von Lfz bisher nur in Ansätzen untersucht.

Die vorliegende Arbeit widmet sich daher der Erstellung und dem Funktionsnachweis eines umfassenden Konzeptes zur automatisierten Anflugführung auf der Basis von ASAS. Sie untersucht die Eigenschaften möglicher Regelungsmethoden bei der Anwendung von ASAS auf Grundlage und in Abhängigkeit der Aussendung von Positionsinformationen via Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) für die verschiedenen Phasen des Anfluges in einer sehr langen Kette von Lfz. Für verschiedene Rahmenbedingungen sollen dabei die jeweils geltenden Randbedingungen für die Anwendbarkeit und Funktionsfähigkeit des ASAS-Konzeptes abgeleitet werden. Dabei soll auch die Einbettung in die bestehende, durch ein Arrival Manager Unterstützungswerkzeug hergestellte Anflugplanung gewährleistet werden.

In der Hauptsache wird konzeptseitig unterschieden zwischen einem Szenario, in dem die Abfolge der zu folgenden Ziel-Luftfahrzeuge (Targets) innerhalb der TMA beim Merging der verschiedenen Verkehrsströme bekannt ist und einem Szenario, in dem jedes Lfz sein Target vor der Aktivierung zunächst selbst identifizieren muss.

Nach einer Simulation der Verfahren in den verschiedenen Anflugphasen soll so die Frage beantwortet werden, ob und unter welchen Voraussetzungen sich das vorgestellte Konzept eines automatisierten ASAS-Anflugverfahrens anwenden lässt bzw. inwieweit die Gestaltung der heutigen Anflugprozeduren angepasst werden muss, damit das Konzept umgesetzt werden kann. Die Ergebnisse der Simulation in Bezug auf die Stabilität und Genauigkeit der Einhaltung der vorgegebenen Abstände entscheiden auch darüber, ob durch die Umsetzung des Konzeptes auf die genaue Ausführung der Sollabstandsvorgaben vertraut werden darf. Trifft dies zu, ist Anlass zur Verringerung der heute angewendeten Sicherheitspuffer gegeben, was letztendlich zur angestrebten Erhöhung der Kapazität im An- und Anflugbereich führt.

Kapitel 2 gibt hierfür zunächst einen Überblick über das heutige Luftverkehrssystem, die Herausforderungen für die Zukunft und bisherige Lösungsansätze in Bezug auf operationelle Konzepte und eingesetzte Technologien, auch vor dem Hintergrund der Harmonisierungsbestrebungen im Europäischen Air Traffic Management (SES und SESAR), in

die sich das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Konzept einfügen muss.

Kapitel 3 geht auf die bisher bekannten ASAS-Manöver und ihre Relevanz für den Flughafennahbereich ein, bevor der durch die Anwendung von ASAS erwartete Nutzen detaillierter erläutert wird. Auf einem Überblick über die bisher stattgefundenen Untersuchungen und Erkenntnisse zur Anwendung von ASAS-Manövern in der TMA folgt dann die Ableitung des mit der Konzeptebene verknüpften Untersuchungsbedarfs.

Kapitel 4 widmet sich der Vorstellung der anwendbaren ASAS-Regelungsverfahren. Es analysiert mittels Matlab das Regelungsverhalten in einer sehr langen Kette von 100 Lfz bei der Anwendung von CTP und CTD Regelungsverfahren im Zusammenhang mit der Datenverarbeitungsrate und stellt ein neues Regelungsverfahren vor.

In Kapitel 5 werden die neuen ASAS-Teilkonzepte für die einzelnen Phasen des Anfluges, unterteilt in Merging am Metering Fix, Intrail-Phase, Merging unter 0° - 90° , Merging unter 180° und Final Turn bei Vorgabe unterschiedlicher Rahmenbedingungen in Bezug auf verfügbare Daten erläutert und die Targetwechselbedingungen für die Zusammenführung der einzelnen Verkehrsströme aufgestellt.

In der Simulation in Kapitel 6 erfolgt mittels Matlab die schrittweise Untersuchung der Anwendbarkeit der ASAS-Teilkonzepte in einer langen Kette von Lfz sowie die Auswahl der Regelungsmethoden, mit denen die in der Konzeptphase abgeleiteten Randbedingungen und die für die Anwendbarkeit erforderlichen Stabilitätskriterien erfüllt werden können.

Alle Überlegungen und Ergebnisse werden in Kapitel 7 schließlich zu einem einheitlichen Betriebskonzept für die Anwendung von ASAS im Flughafennahbereich, wiederum unterteilt in die Szenarien mit bekannten Targets einerseits und mit nicht übermittelten Target andererseits, zusammengeführt.

Kapitel 2

Das Luftverkehrssystem heute und morgen

Das Luftverkehrssystem der kommerziellen Luftfahrt stellt ein komplexes Gefüge verschiedenster Instanzen dar, deren gemeinsames Ziel es ist, das Bedürfnis der modernen Gesellschaft nach uneingeschränkter Mobilität zu befriedigen und die Nachfrage der Wirtschaft an schnellem Transport von Waren und Gütern zu bedienen.

Zu den wichtigsten Instanzen des Luftverkehrs zählen:

- die Airlines
- die Flughäfen und Abfertiger
- die Luftverkehrsdienste (Air Traffic Services)
- der Network Manager (früher CFMU) und
- die regulierenden Behörden

Um eine sichere, geordnete und effiziente Abwicklung des Luftverkehrs zu gewährleisten, ist es erforderlich, sowohl für jede einzelne Flugbewegung, als auch für die Gesamtheit aller Flüge eine Planung durchzuführen und den Fortschritt der Verkehrsbewegungen und die Einhaltung des erstellten Planes zu kontrollieren.

Jede der Instanzen verfolgt ein aus ihrer Sicht optimiertes Management mit unterschiedlichen Schwerpunkten. An erster Stelle steht ohne Frage stets das Sicherheitsmanagement. Daneben spielen das Flottenmanagement der Airlines und das Rollverkehrsmanagement der Flughäfen inklusive des Managements der Bodenprozesse im Luftverkehrsprozess eine ebenso große Rolle wie das Management der Gesamtheit aller sich tatsächlich in der Luft befindlichen Verkehrsteilnehmer, dem Flugverkehrsmanagement.

Das Flugverkehrsmanagement oder Air Traffic Management dient als Oberbegriff für die Managementprozesse der Air Traffic Services, also vornehmlich der Flugsicherung sowie des Network Managers, der auf europäischer Ebene die Aufgabe der Koordinierung aller Flugbewegungen in den einzelnen Luftraumsektoren (s. Abschnitt 2.1.2) wahrnimmt.

Da sich der Inhalt der vorliegenden Arbeit auf den Luftraum bezieht, wird im Folgenden auf das Air Traffic Management genauer eingegangen. Das Management jeder der

Instanzen verfolgt jedoch letztlich dieselbe übergeordnete Managementaufgabe, nämlich den Passagier oder eine Fracht sicher, pünktlich und effizient von einem Ort zum anderen zu transportieren.

2.1 Air Traffic Management

Der Begriff Management bezeichnet allgemein die

„zielorientierte Gestaltung und Steuerung von Organisationen mittels Prozessen und Funktionen, die der Erfüllung der Managementaufgaben dienen“ [WIR]

Die International Civil Aviation Organisation (ICAO) definiert Air Traffic Management als

„dynamisches, integriertes Management des Flugverkehrs (sicher, ökonomisch und effizient) durch die Bereitstellung eines nahtlosen Gefüges von dedizierten Einrichtungen und Diensten in Zusammenarbeit mit allen Luftverkehrsbeteiligten.“ [ICA07]

„Das Ziel von Air Traffic Management besteht darin, jedem Luftfahrzeug zu ermöglichen, pünktlich zu starten und zu landen sowie dafür Sorge zu tragen, dass die Abweichung von der präferierten Trajektorie durch den Luftraum nur so groß wie unbedingt nötig ausfällt, aber ohne dabei das Sicherheitsniveau zu beeinträchtigen.“ [ICA02]

Die ICAO versteht Air Traffic Management als die Gesamtheit von:

- Airspace Management
- Air Traffic Flow and Capacity Management und
- Air Traffic Services (Air Traffic Control und Flight Information Services).

Im Unterschied zur ICAO bezieht die Europäische Union bei der Definition des Air Traffic Management zusätzlich zu den oben aufgeführten „Ground Based Functions“ auch die sog. „Airborne Functions“ in das integrierte Management mit ein. Diese bezeichnen alle an Bord der Luftfahrzeuge befindlichen Einrichtungen, die die Durchführung eines sicheren und effizienten Fluges unterstützen.

2.1.1 Airspace Management

Der kontrollierte Luftraum über Deutschland unterteilt sich in einen unteren und einen oberen Luftraum. Der untere kontrollierte Luftraum reicht im Allgemeinen von 2500 Fuß Höhe bis zur Flugfläche (FL) 245. Die Grenze des oberen Luftraumes liegt bei Flugfläche 460. Lateral erstreckt sich der kontrollierte Luftraum über das gesamte Gebiet der Bundesrepublik. Die laterale Unterteilung des Luftraumes erfolgt im oberen wie im unteren Luftraum in sogenannte Radarsektoren, mit unterschiedlicher Größe und Form, deren Granularität entlang der meistgenutzten Luftverkehrsrouten am feinsten ist.

Laut Luftverkehrsgesetz kann jeder der Sektoren oder Gruppen davon, temporär oder dauerhaft bestimmten Nutzungsbeschränkungen oder einem Nutzungsverbot unterworfen werden. Dies kann z.B. aus Gründen des Flugverkehrsaufkommens, aus militärischen Gründen oder auch aus Gründen des Lärmschutzes geschehen.

Der Luftverkehr wird auf vorgegebenen Luftverkehrsstraßen geführt, welche sich entlang miteinander verbundener Großkreissegmente zwischen den Destinationen erstrecken.

Die Aufgabe des Airspace Management besteht nun darin, sich der Aufteilung des verfügbaren Luftraumes und der Planung der Verkehrsrouten nach verschiedenen Optimierungskriterien anzunehmen sowie die jeweils gültigen Verfahren und Vorschriften zu kommunizieren.

2.1.2 Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM)

Verantwortlich für das ATFCM in Europa ist der Network Manager der Eurocontrol, der für alle am Luftverkehr beteiligten Partner wie Flughäfen, Flugsicherungen und Airlines in den teilnehmenden europäischen Staaten der European Civil Aviation Conference (ECAC) bereitgestellt ist. Ihre Aufgabe besteht darin, die beste Ausnutzung der verfügbaren Kapazität, die Entzerrung von Verkehrsströmen und den Schutz vor Überlastung einzelner Einheiten zu gewährleisten sowie Flugplandaten bereitzuhalten und die Luftraumnutzer bei der Flugplanerstellung zu beraten, um Verzögerungen zu minimieren.

Der Network Manager ist zuständig für die Vergabe von Startzeitfenstern, sog. Air Traffic Slots, mit deren Hilfe eine Überlastung von Kontrollsektoren vermieden wird. Die Flughäfen gelten in diesem Zusammenhang ebenfalls als Sektoren, sodass mit Hilfe der Slots auch der Verkehrszufluss in den Flughafennahbereich, die sog. Terminal Maneuvering Area (TMA), eines Flughafens kontrolliert werden kann.

2.1.3 Air Traffic Control (ATC)

Air Traffic Control bezeichnet die geordnete und flüssige Abwicklung des Luftverkehrs durch Überwachung und Lenkung von Flugbewegungen im kontrollierten Luftraum, sowie der Rollbewegungen auf den Start- und Landebahnen der Flughäfen. Diese Aufgabe wird in der Bundesrepublik von der Deutschen Flugsicherung übernommen.

Die Lotsen müssen zu jeder Zeit über das höchstmögliche Situationsbewusstsein verfügen, um potenzielle Konflikte zu erkennen und zu lösen. Der heutige Ablauf aus Sicht eines Flugzeuges stellt sich exemplarisch wie folgt dar:

Ein Flugzeug, welches zum Abflug bereit ist, meldet sich einige Minuten vor seiner geplanten Abflugzeit via Funk oder Datalink beim Startup-Lotsen im Tower. Spricht nichts dagegen die Freigabe zu erteilen, erhält der Pilot die sog. Start-up Clearance, welche die Streckenfreigabe und zugewiesene Startbahn beinhaltet. Daraufhin meldet sich der Pilot bei der Vorfeldkontrolle (in FRA nicht in Hand der DFS) zum Erhalt der Pushback-Freigabe und darauffolgend der Taxi-Freigabe um den Rollprozess zur Startbahn beginnen zu dürfen. Je nach zugewiesener Startbahn sind nun bestimmte Übergabepunkte festgelegt, an denen der Platzlotse im Tower die Kontrolle des Flugzeuges übernimmt. Diese Übergabepunkte befinden sich in der Regel in der Nähe des Startbahnkopfes der Runway.

Der Towerlotse erteilt dann unter Berücksichtigung der Separation zu anderen startenden und landenden Flugzeugen die Lineup- und die Startfreigabe. Nach dem Start erfolgt die Übergabe des Luftfahrzeuges an die Lotsen der An- und Abflugkontrolle. Der Abfluglotse führt das Flugzeug entlang seiner zugewiesenen Abflugroute bis zum Departure, an dem das Luftfahrzeug an den ersten Enroute-Radarsektor übergeben wird. Jeder Radarsektor ist mit einem Planungsloten und einem ausführenden Lotsen besetzt. Entlang der im Flugplan festgeschriebenen Route wird das Luftfahrzeug nun von Sektor zu Sektor gereicht, wobei sich die Lotsen bei Geschwindigkeits- und Höhenfreigaben möglichst an den Wünschen der Airline orientieren sollten, sofern keine Konfliktsituationen auftreten. Die Lotsen jedes einzelnen Radarsektors erfahren erst ca. 30 Minuten vor dem Eintritt eines Lfz in den Sektor über dessen Eintreffen. Mit Verlassen des letzten Enroute-Sektors wird das Lfz von der Streckenkontrolle an die Anflugkontrolle übergeben, die den Zufluss des Verkehrs in die TMA reguliert. Bei Überlastung der TMA stehen Holding Areas zur Verfügung, in denen die Lfz Warteschleifen fliegen, bis sie die TMA-Grenze am Initial Approach Fix oder Fix passieren dürfen. Der sog. Pickup-Lotse übernimmt die Luftfahrzeuge und führt sie durch die TMA bis auf den Gegenanflug, wo sie an den sog. Feeder-Lotsen übergeben werden, der die Entscheidung darüber trifft, wann das Lfz auf den Endanflug (Final) eindrehen darf und die letzte Phase seines Anfluges beginnen kann. Innerhalb der TMA müssen verschiedene Verkehrsströme zusammengeführt werden, was einen hohen Koordinierungsaufwand und für die Lotsen eine hohe Arbeitsbelastung darstellt. Auf dem letzten Abschnitt des Landeanfluges werden die Lfz dann wieder an die Lotsen des Towers übergeben. Diese erteilen bei stabilisiertem Anflug die Landefreigabe und führen nach der Landung das Flugzeug zu einem der Übergabepunkte, wo sie wieder von der Vorfeldkontrolle übernommen und bis zu ihrer Position geführt werden. Am Übergabepunkt endet die Verantwortlichkeit der Flugsicherung für den Inbound.

Die Verfahren und Rollenbezeichnungen im Flughafennahbereich in obigem Beispiel beziehen sich auf den Flughafen Frankfurt Main. Es bestehen je nach Größe und Komplexität eines Flughafens jedoch lokale Unterschiede in Rollenbezeichnungen, Anzahl der ausführenden Lotsen und der Organisation innerhalb der TMA, sowie der Verantwortlichkeiten im Rollverkehr.

Der heutige Ablauf im Verantwortungsbereich der Flugsicherung ist geprägt durch das First Come First Serve Prinzip (FCFS), was die Interpretation der Flugsicherung der an sie von den Airlines gestellten Anforderung nach sicherer und verzögerungsfreier Flugabwicklung darstellt.

2.2 Herausforderungen für die Zukunft

Es ist bekannt, dass nach den Luftverkehrsprognosen die Nachfrage an Personen- und Gütertransport in naher Zukunft unter Einsatz der heute gebräuchlichen Technologien und Verfahren nicht mehr bedient werden kann. Schon heute stößt das Luftverkehrssystem an seine Grenzen.

Bereits im Jahre 1993 hat die ICAO festgeschrieben, dass es zu den Aufgaben des Air Traffic Management gehört

- das sichere und geordnete Wachstum der internationalen zivilen Luftfahrt zu unterstützen
- der zunehmenden Nachfrage im Flugverkehr zu begegnen
- Sicherheit, Regelmäßigkeit und Effizienz zu steigern sowie
- durch national übergreifende Integration Synergien zu schaffen und zu nutzen

Das Finden und Umsetzen von Lösungen, die sich dieser Anforderungen annehmen, stellt sich als überaus komplexes, schwieriges und durchaus träges Unterfangen dar, das in der Vergangenheit in verschiedenen Programmen und Projekten mit gegengerichteten und auf Ebene des operationellen Konzeptes zum Teil unvereinbaren Ansätzen adressiert wurde.

Im Laufe der Zeit kristallisierte sich immer mehr die Notwendigkeit heraus, einen europaweit harmonisierten Ansatz zu verfolgen. Der Gedanke des 'Single European Sky' (SES) wurde geboren.

Zukünftiges Air Traffic Management hat sich sowohl auf strategischer, als auch auf operativer Ebene einer Vielzahl von Herausforderungen zu stellen. Diese betreffen

- Sicherheit
- Kapazität (Schaffung und effiziente Nutzung)
- Planung, Kooperation und Interessen
- Technologie und
- Umwelt

Aus heutiger Sicht lassen sich in Bezug auf den gesamten Luftverkehrsprozess einige Defizite identifizieren. Vor dem Hintergrund des steigenden Luftverkehrs erscheinen diese um so gravierender, als eine Beibehaltung der heutigen Strukturen und Abläufe die Effizienz des gesamten Prozesses stark einschränken würde.

Besonders schwerwiegend ist die Auswirkung von unausgeglichem Verkehr auf die Effizienz der Verkehrsabwicklung an Flughäfen, die bereits heute an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen. Hier bewirkt ein Anstieg in der Nachfrage (Demand) um nur ein Prozent bereits eine Verschlechterung der Pünktlichkeit um 7 Prozent (vgl. Abb. 2.1).

Die Steigerung der Effizienz durch die Nutzbarmachung versteckter Kapazität ist deshalb von großer Wichtigkeit. Dies gilt umso mehr, als die Möglichkeit der Schaffung neuer Kapazität sowohl in der Luft als auch auf dem Boden begrenzt ist.

Unter Kapazität versteht man das Leistungsangebot von Menschen und/oder Betriebsmitteln in einem bestimmten Zeitabschnitt. Bezogen auf das Luftverkehrssystem bedeutet Kapazität die pro Zeiteinheit ohne Einschränkung der Sicherheit abwickelbare Anzahl von Flugbewegungen.

Die Kapazität des Luftverkehrssystems setzt sich aus drei Komponenten zusammen

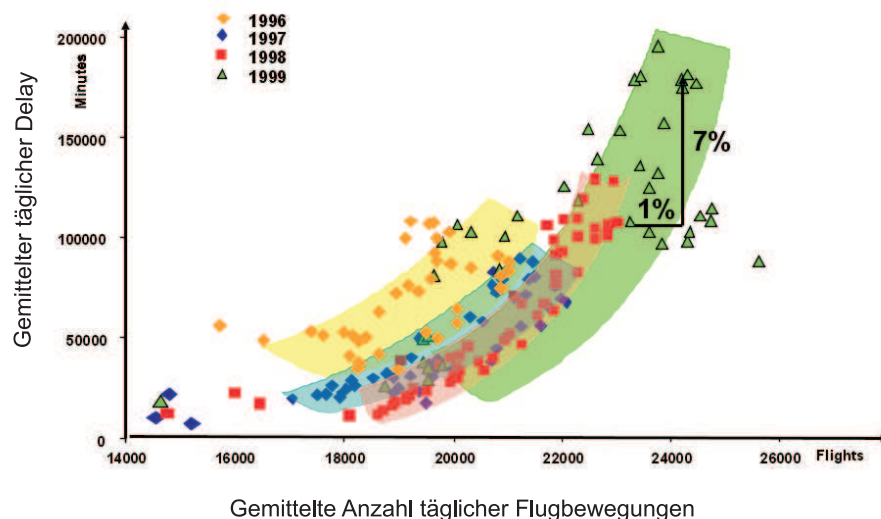


Abbildung 2.1: Zunahme des Verspätungen bei wachsendem Verkehr (Quelle:[TU b])

- Kapazität des Flughafens
- Kapazität des Luftraums
- Kapazität des Menschen

Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die sie limitierenden Faktoren. Die geringste dieser Kapazitäten bestimmt das Maximum der Gesamtkapazität (Systemkapazität).

Den Engpass des Systems stellen die Schnittstellen zwischen Luft und Boden, nämlich die zur Verfügung stehenden Start- und Landebahnen (Runways), dar. Hier existiert durch die Wirbelschleppenbildung eine physikalische Grenze bei der Steigerung des Durchsatzes. Die Wirbelschleppen selbst zu reduzieren oder deren Einfluss mittels alternativer Anflugverfahren zu mindern, ist zwar Gegenstand von Forschung und Entwicklung, jedoch wird allein durch das räumliche Verhältnis zwischen Luft und Boden klar, dass Start- und Landebahnen als Engpass bestehen bleiben. Aus diesem Grund ist es erforderlich, der Rolle der Runways als Schnittstelle der Teilsysteme Luft und Boden im Hinblick auf die Steigerung des Durchsatzes besondere Aufmerksamkeit zu widmen und deren Nutzung zu optimieren.

Das Ziel dabei besteht darin, die Belastung der jeweiligen Ressource durch die einzelne Flugbewegung zu reduzieren, um so die Gesamtanzahl der Flugbewegungen pro Zeiteinheit zu erhöhen.

In Bezug auf die Ressourcen Luftraum und Flughafen kann die zeitliche Belastung aber immer nur so gering sein wie es die Nutzungsplanung unter den gegebenen Sicherheitsrandbedingungen erlaubt.

Die Kapazität kann einerseits gesteigert werden, indem die Nutzungsplanung selbst unter Beachtung der Sicherheitsrandbedingungen und der Verwendung der technischen Gegebenheiten optimiert wird, wie beispielsweise bei der Berechnung einer zeitlich möglichst kurzen Anflugsequenz bei unterschiedlichen Mindeststaffelungen zwischen Lfz verschiedener Wirbelschleppenkategorien oder der Verwendung des High Approach Landing Systems.

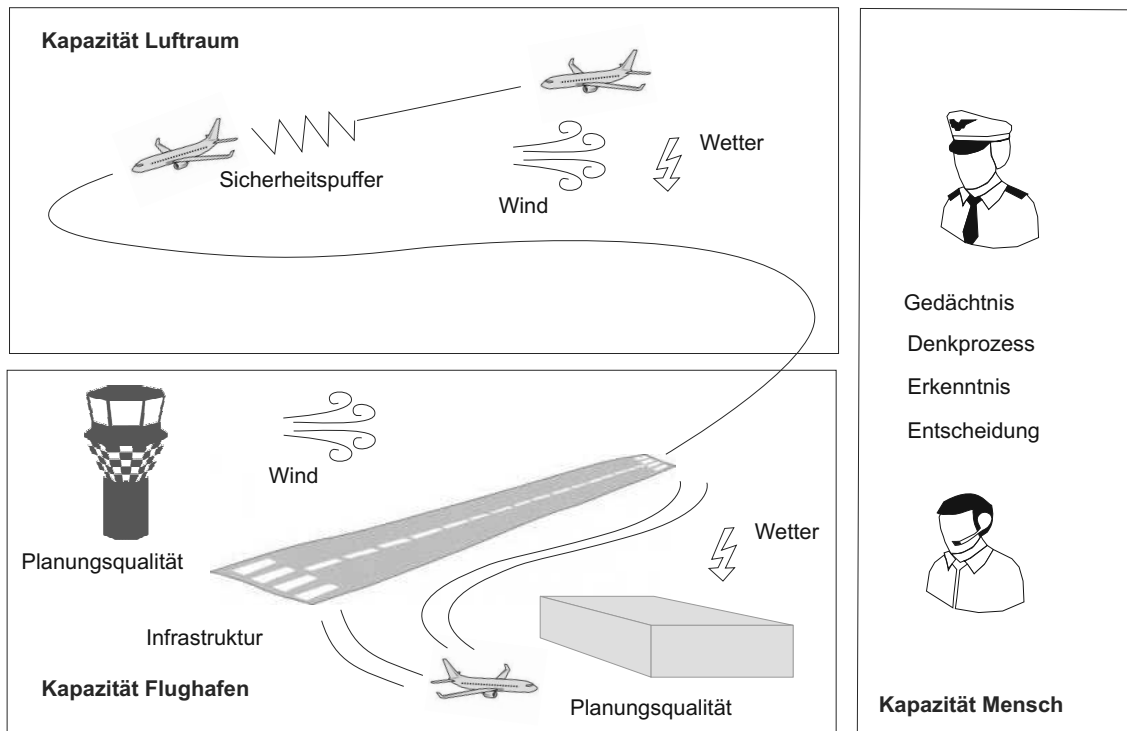


Abbildung 2.2: Limitierende Faktoren für Kapazität

Andererseits bewirkt die Einführung neuer Technologien eine unmittelbare Belastungsreduzierung, also die Verringerung von Prozesszeiten, wie beispielsweise im Fall der „Break to Vacate“ Funktionalität zur Reduzierung der Runwaybelegungszeit.

Die signifikanteste Steigerung der Kapazitätsnutzung wird jedoch durch die Anwendung von technologischen Neuerungen erreicht, die zur genaueren Durchführung oder Überwachung einer Flugbewegung beitragen, wodurch der bei der Planung anzuwendende Sicherheitspuffer reduziert wird, so wie bei Einführung neuer CNS-Technologien, mittels derer in der Vergangenheit eine Reduzierung der vertikalen Mindestseparation von 2000ft auf 1000ft ermöglicht wurde.

Planung, Durchführung und Überwachung der Abläufe in der Luft und auf dem Boden stellen angesichts deren Komplexität und Interdependenz eine große Herausforderung dar und sind ohne Automatisierung bei dem heutigen Verkehrsaufkommen nicht mehr zu bewältigen.

Der Gesamtprozess kann durch kooperative Informationsbereitstellung erheblich verbessert werden, was wiederum die Verfügbarkeit von technologischen Möglichkeiten zu deren Austausch in ausreichender Bandbreite voraussetzt. Dies beinhaltet auch eine ständige Verifizierung und Aktualisierung der prädizierten Daten der Trajektorien aller Lfz. Hindernis dabei stellen insbesondere die Bereitschaft der Luftraumnutzer dar, die für eine effiziente Prozessgestaltung nötigen Daten allen Beteiligten und damit auch der Konkurrenz offen zu legen.

Ein weiteres Problem im heutigen Luftverkehrssystem besteht darin, dass die Ziele der Hauptbeteiligten Airlines, ATC und Flughäfen nicht aufeinander abgestimmt sind, woraus sich unterschiedliche Sichtweisen ergeben.

ATC und auch der Network Manager betrachten den Ablauf eines Fluges aus einer Gate-to-Gate Sicht. Das bedeutet, dass für sie der gesamte Prozess mit Offblock bzw. Takeoff der einzelnen Flüge beginnt und endet, wenn das Lfz am Zielflughafen gelandet ist. Die Airlines als Kunden der Flugsicherung fordern dabei aus wirtschaftlichen Gründen einen möglichst zügigen und verzögerungsfreien Ablauf.

Sind Kapazitätsengpässe in der Luft zu erwarten, werden daher einzelne Lfz durch die Vergabe von Slots auf dem Boden zurückgehalten. Dies geschieht jedoch ohne Abstimmung mit den Flughäfen, die den gesamten Ablauf als Air-to-Air oder auch Enroute-to-Enroute Prozess verstehen. Die Flughäfen verfolgen das Ziel einen hohen Durchsatz an Flugzeugen bei möglichst hoher Pünktlichkeitsrate zu erreichen. Am Boden wartende mit Slots behaftete Flüge blockieren jedoch die Parkpositionen für einen längeren Zeitraum als geplant und stören damit den Ablauf aus Sicht der Flughäfen.

Die Herausforderung dabei eine Steigerung der Effizienz und damit auch eine Erhöhung der Kapazität zu erreichen besteht darin, einen integrierten Prozess zu entwickeln und umzusetzen, der die Probleme, die aus diesem unterschiedlichen Verständnis und Interessen heraus entstehen, vor allem an den Schnittstellen zwischen Luft und Boden zu beseitigen.

Dazu zählt auch die Vergabe von Startslots durch den Network Manager. Die Reduzierung von Slots durch besseres Air Traffic Flow Management würde einen hohen Beitrag zur Effizienz des Gesamtsystems leisten.

Dies ist eng verbunden mit der rechtzeitigen und umfangreicheren Bereitstellung von einzelflugbezogenen Informationen, beispielsweise über vorherzusehende Verspätungen, die allen Partnern zugänglich sind. Dies muss nicht nur in Bezug auf Verfahren, sondern auch technisch gelöst werden.

Die Steigerung der Kapazitäten durch verbesserte integrierte Planung führt jedoch nur zum Erfolg, wenn die geschaffenen Kapazitäten auch genutzt werden können. Die Umsetzung besitzt einen menschlichen und einen technologischen Aspekt.

Stellt der Mensch, also im konkreten Fall der Lotse den limitierenden Faktor bei der Bewältigung der aus der erhöhten Kapazität gestiegenen Abwicklung von Flugbewegungen dar, wird er wiederum zum limitierenden Faktor für die Gesamtkapazität. Das Auftreten dieses Problems wird hauptsächlich im Bereich der TMA erwartet, wo bereits heute eine hohe Arbeitsbelastung der Lotsen festzustellen ist. In diesem Fall ist es erforderlich, die Lotsen durch entsprechende Automatisierung zu entlasten.

Zum anderen müssen auch an Bord der Flugzeuge die Voraussetzungen geschaffen werden, um die Anforderungen an die örtliche und zeitliche Navigationsgenauigkeit, die sich aus der Zielsetzung der Kapazitätserhöhung ergeben, zu erfüllen.

Darüberhinaus wachsen mit dem steigenden Verkehr auch die Herausforderungen in Bezug auf Lärm und Emissionen. Über allem steht jedoch selbstverständlich die unbedingte Anforderung auch in Zukunft ein hohes Sicherheitsniveau zu erhalten und dieses durch die Nutzung neuer Technologien und Verfahren weiter zu erhöhen.

2.3 Lösungsansätze

2.3.1 Harmonisierung von Forschung und Zielsetzungen

Der Weg zur Umsetzung der von der ICAO gestellten Anforderungen erfolgte nicht von Beginn an im Konsens und in Kooperation aller Organisationen und Beteiligten. Vielmehr stellte sich die Zukunft des ATM als eine Vielzahl von Ideen dar, der Weiterentwicklung einzelner Gedanken ohne Betrachtung der Auswirkungen über die Schnittstellen von einzelnen Funktionalitäten hinaus. Auch fiel es zunächst schwer, den Bedarf für die Zukunft genau zu definieren und daraus ein weitgehend einheitliches operationelles Konzept zu schmieden.

Die Definition operationeller Teilkonzepte in Top-Down Ansätzen in Projekten wie EMERALD, Gate-to-Gate, C-ATM oder Airport-CDM überschneidet sich mit zahlreichen bottom-up Projekten wie NUPI/II/II+, Link2000+, MFF, CASCADE oder MA-AFAS), die mit der Ableitung von operationellen Verfahren aus den Möglichkeiten neuer Technologien, einen potenziellen Nutzen für das ATM System untersuchten (s. Abb. 2.3.1).

Erste Ansätze zur einheitlichen Strukturierung der Entwicklung des ATM Systems entstanden Anfang der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts als die Verkehrsminister der ECAC Staaten die sog „ECAC Strategy“ verabschiedeten. Damit einher ging die Bildung eines Programms zur Harmonisierung und Integration der Flugsicherung in Europa (EATCHIP) unter Leitung der Eurocontrol die damit ihre Rolle als europäische ATM Planungsorganisation begründete und den institutionellen Rahmen bildete, um einheitliche ATM Einrichtungen einführen zu können, mit dem Ziel, die Luftraumkapazität zu steigern.

Bereits in diesem Programm sollte eine Anpassung der Luftraumstruktur an Verkehrsströme umgesetzt werden, eine Forderung die erst 10 Jahre später mit der Verabschiedung des SES I Paketes (s. Abschnitt 2.4) gesetzlich verankert wurde. Weitere zentrale Punkte des Programms umfassen die Einführung von Flächennavigation (RNAV) und die flexible Luftraumnutzung (FUA) durch militärische und zivile Luftfahrt, die als Ergebnis dieses Programms bereits im Jahr 1996 in 90% der europäischen Kontrollzentralen aktiv war. Mittels der im Programm umgesetzten ersten Harmonisierung der Flugverkehrskontrollsysteme und Verfahren konnte eine Kapazitätssteigerung um 50% erreicht werden. Ein großer Erfolg, der wie sich herausstellte, aber nicht ausreichend war, um die vorhergesagte Steigerungsrate der Verkehrsnachfrage bedienen zu können.

In der Folge verfasste Eurocontrol im neuen Jahrtausend auf Anfrage der ECAC Staaten im Jahr 2000 die erste Version der sog. Air Traffic Management Strategy 2000+ [EUR03] (Update in 2003). Auf Basis des von Eurocontrol erstellten Dokumentes wurde das EATMP Programme ins Leben gerufen, das die Entwicklung eines nahtlosen, gesamteuropäischen ATM Systems weiterverfolgte. Es sollte gemeinsam mit allen Beteiligten eine zügige Implementierung eines einheitlichen kooperativen Netzwerkes vorantreiben.

ATM Strategy 2000+ sah eine Roadmap mit folgenden Stationen vor

- Implementierung verbesserter Konzepte des Kapazitätsmanagements
- erweiterte CNS Funktionalitäten

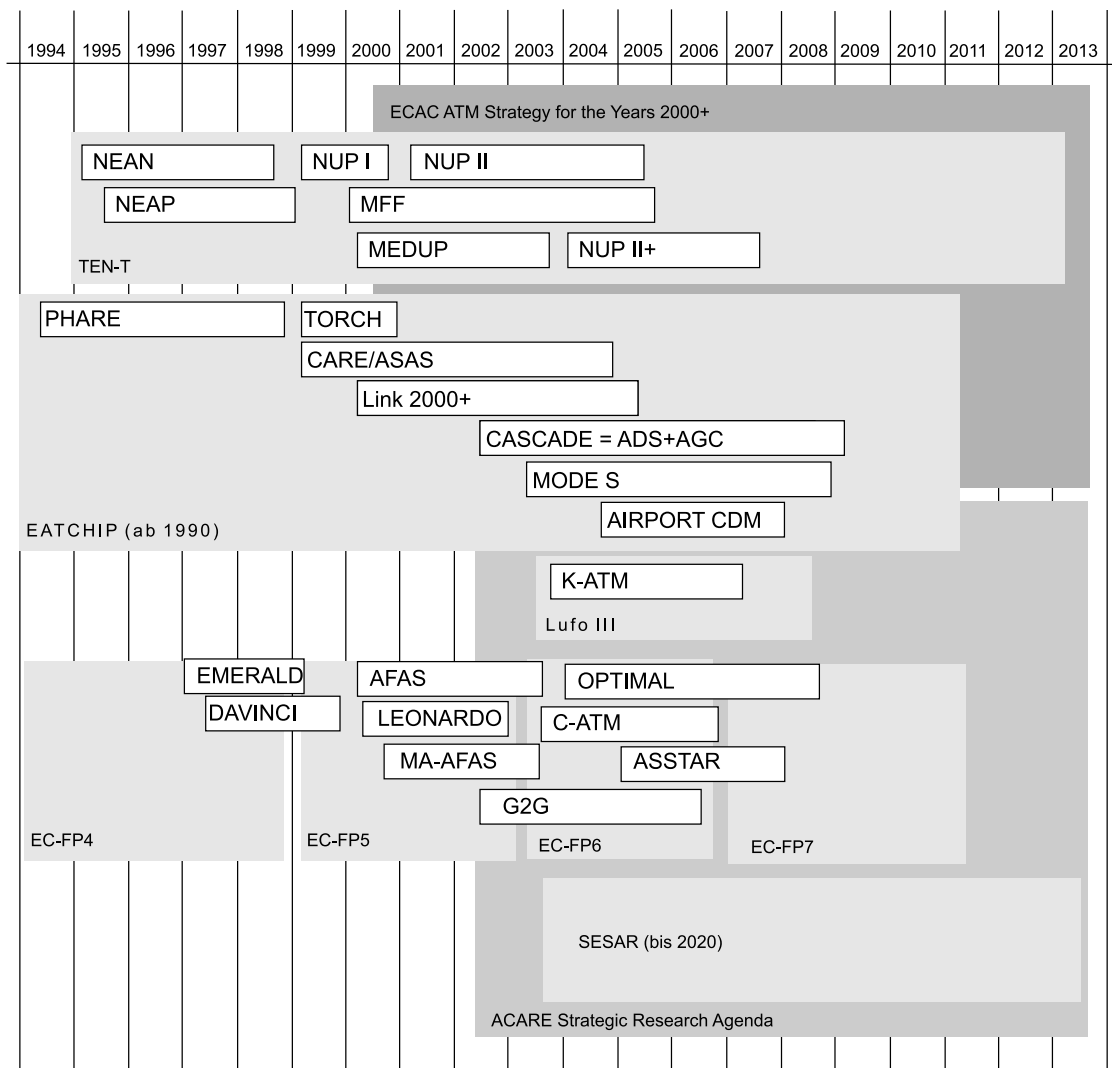


Abbildung 2.3: ATM Projekte der vergangenen 20 Jahre

- verbesserte Controller Tools
- verbessertes Flow Management
- verstärkte Automatisierung
- erhöhte Situational Awareness onboard bis hin zur
- Umverteilung von Aufgaben von Lotse zu Pilot

Ein Jahr später formulierte eine Arbeitsgruppe von sog. Aviation Personalities bestehend aus Verantwortlichen aus dem Bereich der Airlines und Flughäfen, Flugsicherungen, Aufsichtsbehörden sowie Flugzeug-, Triebwerks- und Avionikherstellern die sog. „Vision 2020“, die die Bildung eines Beirates mit dem Ziel der Formulierung einer „Strategic Research Agenda“ (SRA) [SRI] für die europäische Luftfahrt empfahl.

Daraufhin erfolgte im Jahr 2001 die Gründung des „Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE)“, der die erste Version der SRA im Oktober 2002 vorlegte (Update zu SRA2 in 2004, später „Strategic Research and Innovation Agenda“). Die Agenda beschreibt die aus dem antizipierten Bedarf und den Anforderungen aller Beteiligten resultierenden notwendigen Aktivitäten zur Erreichung der gesteckten Ziele in den Bereichen Qualität, Effizienz, Sicherheit (Safety und Security) sowie Umwelt. Besonders relevant im Kontext zur vorliegenden Arbeit sind zwei der Ziele, die sich auf die Erhöhung der Effizienz des ATM Systems beziehen. Diese sind

- die Erhöhung des Nutzungsgrades inhärenter Kapazität des Air Traffic Managements und des Luftraums sowie
- die Maximierung der Airport Performance

Die ATM Strategy 2000+ und EATMP sowie SRA I/II lieferten das Fundament, auf dessen Grundlage das erste Single European Sky Paket (SES I) sowie die darauf folgende Definitionsphase von SESAR beruhen.

Aufgrund ihrer hohen Bedeutung für die Zukunft des europäischen Luftverkehrsmanagement wird auf SES und SESAR in Abschnitt 2.4 gesondert eingegangen.

2.3.2 Operationelles Konzept

Der Schlüssel zur Steigerung der Effizienz des Luftverkehrssystems besteht darin, ein widerspruchsfreies, ganzheitliches operationelles Konzept zu entwickeln, das auf Kooperation aller Beteiligten basiert und die gestellten Anforderungen in allen Punkten erfüllen kann.

Im Rahmen vergangener Projekte wurden operationelle Konzepte entwickelt, die einen oder mehrere Aspekte der angestrebten übergeordneten Ziele adressieren. In der Praxis jedoch ist es häufig nicht gelungen, die Veränderungen in den Betrieb zu übernehmen. Dies lag einerseits daran, dass die Schnittstellen der operationellen Teilkonzepte für einen übergreifenden betrieblichen Ablauf nicht berücksichtigt wurden und andererseits an der Tatsache, dass die Neuerungen häufig mit der Herausgabe von als sensibel geltenden

Informationen zusammenhängen. Nicht zuletzt scheiterte die Umsetzung auch an der technologischen Komponente, die entsprechenden Daten an die jeweiligen Adressaten zu übermitteln.

Erste Ansätze, die Vorteile kooperativer Abläufe aufzuzeigen, kamen bereits Anfang der 90er Jahre auf. Eines der ersten Projekte war PHARE das „Programme for Harmonised ATM Research in Eurocontrol“ [PHA] (innerhalb EATCHIP) in welchem aktuelle Forschungsthemen im Bereich ATM auf europäischer Ebene zusammengeführt werden sollten. Das Ziel von PHARE war es, angetrieben durch den technologischen Ansatz von Datenaustausch zwischen Bord und Boden, das Potenzial neuer Konzepte für ein zukünftiges ATM System zu untersuchen. PHARE sollte zeigen, dass ein integriertes Bord-Boden-System mit entsprechenden Werkzeugen in der Lage ist, die Luftraumkapazität zu erhöhen. Als ein wichtiger kapazitätsbestimmender Faktor wurde in diesem Projekt die Arbeitsbelastung der Controller angesehen. Die entwickelten Werkzeuge zielten daher hauptsächlich darauf ab, diese durch Automatisierung der bodenseitigen Prozesse zu verringern.

Kooperativer Gedanke bei der Entwicklung eines Planungstools mittels dessen die Arbeitsentlastung der Lotsen erreicht werden sollte, bestand darin, die an Bord eines jeden Flugzeuges im Flight Management System (FMS) gehaltenen Daten auch am Boden zur Verfügung zu stellen. Somit wäre mithilfe neu zu entwickelnder Bodenwerkzeuge eine bessere Prädiktion der einzelnen Trajektorien möglich und potenzielle Konflikte zwischen zwei oder mehreren Luftfahrzeugen könnten frühzeitig identifiziert werden. Weiterhin sollte es im Falle eines Konfliktes möglich sein, dem betroffenen Luftfahrzeug eine alternative Trajektorie zuzuweisen, beziehungsweise eine neue Trajektorie zu verhandeln, die daraufhin räumlich und zeitlich genau abgeflogen wird. Im Rahmen dieses Projektes wurde deshalb u.a. vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) ein sog. 4D fähiges FMS entwickelt, welches in der Lage ist, auch zeitliche Randbedingungen der zu fliegenden Trajektorie zu erfüllen.

Obiges Konzept sollte sowohl für Enroute-Phasen als auch für die erweiterte TMA validiert werden. Das Vorhandensein einer Datalink-Verbindung wurde dabei vorausgesetzt. Auf Bodenseite wurde für den Anflugbereich ein Arrival Management System entwickelt, das Trajektoriengenerierung, Konfliktmanagement und optimale Sequenzplanung in sich vereint. Als Maßzahlen zur Bewertung des Konzeptes, der Werkzeuge und ihrer Bedienschnittstellen dienten neben der Arbeitsbelastung der Controller hauptsächlich der erzielte Durchsatz, die durchschnittliche Flugzeit und die Ablieferungsgenauigkeit an der Schwelle. Die Auswertung der Simulationen zeigte, insbesondere im Falle hohen Verkehrsaufkommens, eine Verbesserung der Kenngrößen gegenüber dem Referenzszenario ohne Unterstützungswerkzeuge.

Die in dieser langjährigen Untersuchung behandelten Konzepte wurden in späteren Projekten häufig wieder aufgegriffen, erweitert und verbessert. Dazu gehören hauptsächlich die dynamische, kooperative Planung, sowie das Arrival- und Departuremanagement.

Das Projekt TORCH [TOR00] griff die Idee der Planungsverbesserung durch frühzeitigen Informationsaustausch zwischen den beteiligten Instanzen von neuem auf und entwickelte ein Konzept der kaskadenartigen Planung zur Verbesserung des Airspace und Flow Managements sowie die zugehörigen Lotsenapplikationen. Der Planungshorizont ist dabei so weit gefasst, dass möglichst viele Informationen über den operationellen Ablauf frühzeitig erfasst, aktualisiert und präzisiert werden können.

Ein Projekt mit dem Namen Gate-to-Gate (2002 - 2006) [G2G07] erweiterte den integrativen Ansatz mit dem Ziel ein neues operationelles Planungs- und Umsetzungskonzept zu erarbeiten und zu validieren, welches alle Flugphasen beinhaltet und im Idealfall das Air Traffic Flow Management bereits am Gate des Startflughafens dynamisch mitbestimmt. Es zeichnete sich ab, dass ein integriertes Arrival/Departure Management inklusive einer Final Approach Spacing Assistance (FASA) eine merkliche Effizienzsteigerung mit sich bringt, was wahrscheinlich den Ausschlag dafür gab, in zukünftigen Projekten eher flughafenzentrierte Optimierungsansätze zu verfolgen (s. auch Leonardo). Neben verschiedenen Optimierungen im Enroute-Sektor, adressierte Gate-to-Gate auch Möglichkeiten der Steigerung der Effizienz in der TMA, mit verstärktem Fokus auf Planungsfunktionalitäten des Arrival Managers (AMAN) und der Einführung erster ASAS Sequencing&Merging Verfahren in der TMA.

Auch dieses Teilkonzept beruht auf der Annahme, dass ein künftiges ATM System über einen Datenaustausch und Koordinierung zwischen den Sektoren aber auch zwischen Bord und Boden verfügt und auch die Integration von auf Basis von Bordsystemen abgeleiteter Daten vorsieht. Das genaue Vorgehen und Ablauf eines solchen Datenaustausches zur Ausschöpfung des Effizienz- und Kapazitätspotenzials wurde im Projekt Airport-CDM (Teil von EATMP) erarbeitet. Das A-CDM Konzept implementiert einen kaskadenartigen Planungsprozess, der auf Basis ständig aktualisierter Departure Planning Information (DPIs) und Flight Update Messages (FUMs), die von den einzelnen Lfz versendet werden, ein verbessertes Flowmanagement und eine effizientere Slotvergabe ermöglicht. A-CDM [AC] ist an den Flughäfen München (seit 2007) und Frankfurt Main (seit 2011) und einigen weiteren europäischen Flughäfen bereits in den regulären Betrieb überführt worden.

Das Projekt C-ATM (2002-2006) [CAT05] verfolgte die Errichtung eines kollaborativen, einheitlichen bord-boden-integrierten ATM Systems, welches über eine hohe Qualität hinsichtlich der taktischen Präzisierung der Luftverkehrssituation verfügt. Die Rolle der Flughäfen als kritische Ressource im Luftverkehrssystem wurde darin weiter gestärkt. Auch dieses Konzept sah zur Erreichung dieser Ziele den Austausch von Informationen in einem „Network Operations Plan“ vor, auf der allen Beteiligten uneingeschränkter Zugriff auf die Daten des ATFCM, der Airlines, der Flughäfen, des Militärs geben soll. Die ständige Aktualisierung ermöglicht einen rollierenden sich stetig verbessernden Planungsprozess bis zu einem Zeitpunkt zu dem abgestimmte Verkehrssequenzen mit den minimal möglichen Abweichungen abgearbeitet werden können. Die Arbeitsbelastung der Lotsen im Enroute-Bereich sollte durch die Verbesserung der Synchronisierung des Verkehrs, basierend auf sog. „Traffic Intent Data“ reduziert werden. In der TMA versprach man sich, ermutigt durch vorangegangene Untersuchungen (z.B. CoSpace [COS]), eine merkliche Kapazitätserhöhung dadurch, dass die Aufgabe der Separationseinhaltung zum umgebenden Verkehr vom Lotsen an den Piloten delegiert werden sollte. Die Verantwortung für die Separation sollte jedoch zunächst beim Lotsen verbleiben (s. auch Kapitel 3).

Das im Projekt C-ATM (2002-2006) entwickelte operationelle Konzept stellt gemeinsam mit dem OCD von Eurocontrol die Grundlage für das in SESAR (s. Abschnitt 2.4) festgeschriebene und abgestimmte operationelle Zielkonzept dar. Das OCD bildet im Wesentlichen die ATM 2000+ Strategy ab und vereint alle oben genannten Aspekte eines zukünftigen ATM. Im Gegensatz zu den operationellen Konzepten aller anderen Projekte

wird das OCD der Eurocontrol seit dem Jahr 1999 stetig angepasst und weiterentwickelt, wobei inhaltlich verwandte Forschungsarbeiten verfolgt, bewertet, gefiltert und konsolidiert werden. Der Charakter des Eurocontrol OCD beinhaltet jedoch zusätzlich zu den in C-ATM adressierten Elementen auch strategischere Aspekte wie

- die Einführung reduzierter Separation Minima
- die flexiblere und dynamischere Nutzung des Luftraumes
- die Optimierung von Routenstrukturen
- die verstärkte Nutzung frei wählbarer Routen und nutzeroptimierter Trajektorien oder
- verbessertes vorausschauendes Air Traffic Flow and Capacity Management

Von Interesse für die vorliegende Arbeit sind die Ansätze für das operationelle Konzept in Flughafennähe und dessen Schnittstellen zum Gesamtkonzept.

Untersuchungen zum Nutzen eines integrierten Prozesses, der die Sichtweisen von Airline, Flugsicherung und Flughafen integriert, wurde erst in jüngerer Zeit vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt, so z.B. auch im Projekt iPort des nationalen LufolV-II Forschungsprogrammes.

Der Flughafen selbst verfügt über Prognosen der Gesamtkapazität und kann diese entsprechend der Start und Landenachfrage aufteilen. Basierend darauf besteht die Möglichkeit der Zuweisung einer Start oder Landezeit und einer Runway, bei deren Einhaltung die maximale Pünktlichkeit einer Menge von Flügen erreicht wird. Zielzeiten in dieser Form existieren heute nicht.

Zwar erhalten die Lotsen heute bereits Unterstützung durch Arrival Management Systeme, die anhand einer Menge ankommender Flugzeuge eine optimale Sequenz für die Abwicklung innerhalb der TMA erstellt und daraufhin optimierte Zielzeiten für das f Fix vergibt. Jedoch gilt im Anflug dabei nach wie vor das First-Come-First-Serve Prinzip. Treffen Flüge zu früh am Einflugpunkt, dem sog. Metering Fix ein, werden diese unter Umständen sofort zur Landebahn geführt, während eigentlich pünktliche Flüge die diesen folgen, aufgrund der dann ausgeschöpften Kapazität im Flughafennahbereich in Holdings dirigiert werden müssen.

Vieles deutet darauf hin, dass ein Wechsel vom heute praktizierten First Come First Serve Prinzip hin zu einem On Time Service Prinzip hohes Optimierungspotenzial birgt. Ohne eine entsprechend Vorsteuerung mit zeitlich größerem Horizont kann dies jedoch nicht umgesetzt werden. Daher wird im Rahmen von SESAR (s. Abschnitt 2.4) der Übergang von Startslotzeiten (CTOTs) auf sog. Target Times of Arrival (TTAs) untersucht, die einerseits dem Luftraumnutzer erhöhte Flexibilität bieten als auch die Ankunftsgenauigkeit am Zielflughafen verbessern.

2.3.3 Technologie

Die Mehrzahl der signifikanten Verbesserungen im Luftverkehrssystem sind nicht auf die Verbesserung von Verfahren im Status Quo zurückzuführen, sondern auf die Anwendung

neuer Technologie und die Einführung von Verfahren, die durch die Technologie erst ermöglicht werden.

Die Erstellung eines operationellen Konzepts, welches innerhalb eines bestimmten Zeitraumes zum Einsatz kommen soll, kann somit nicht losgelöst von existierenden und verwendbaren Technologien betrachtet werden. Beispielsweise kann die Nutzung von örtlich und zeitlich einzuhaltenden Trajektorien in den operationellen Konzepten nur Eingang finden, weil Flight Management Systeme entwickelt wurden, die über diese Funktionalität verfügen (s. Projekt AFAS).

Die Mehrzahl der Projekte der Vergangenheit waren hauptsächlich technologiegetrieben und verfolgten einen bottom-up Ansatz, indem man das Potenzial neuer Communication, Navigation und Surveillance (CNS)-Technologien und abgeleiteter technischer Applikationen im Hinblick auf eine nutzbringende Verwendung im operationellen Betrieb untersuchte.

In dem von Eurocontrol koordinierten Projekt Link2000+ zeigten die Untersuchungsergebnisse, dass mit der Einführung eines zweiten VDL Mode 2 Air/Ground Channels bei einem Ausrüstungsgrad von 75% eine Kapazitätssteigerung um bis zu 11% erreicht werden kann. Die Inbetriebnahme im oberen Luftraum ist für das Jahr 2013 geplant. Diese wird dadurch erreicht, dass ein Großteil der routinemäßigen Kommunikation über Funk, inklusive der Erteilung von Freigaben entfällt.

Mit dem Abschluss der flächendeckenden Einführung des Mode-S Transponders im Jahr 2005 bestand fortan die Möglichkeit zusätzlich zur Position, selektive Abfragen bezüglich Identität und Flughöhe einzelner Lfz durchzuführen, wodurch ein wesentlicher Beitrag zur Planbarkeit im Air Traffic Flow and Capacity Management geleistet werden konnte.

Als eines der wichtigsten Schlüsseltechnologien zur Steigerung von Kapazität, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit wird die Übertragung von Flugdaten via Automatic Dependant Surveillance-Broadcast (ADS-B) angesehen. ADS-B Nachrichten basieren auf von einem Global Navigation Satellite System (GNSS) abgeleiteten Daten. Neben der Position können die Nachrichten auch Höhe, Geschwindigkeit und weitere Daten des Zustandsvektors sowie Trajectory Intent Data enthalten. ADS-B Nachrichten werden durch entsprechende Geräte im ASTERIX CAT 21 Format codiert (s. Appendix A). Die Übertragung kann via VHF (VDL mode 2 oder 4), 1090ES oder 978MHz UAT Universal Access Transceiver, stattfinden. Bei der Ausrüstung der Lfz mit ADS-B wird zwischen 'ADS-B out', der Fähigkeit zum Versenden und 'ADS-B in', der Fähigkeit zur Verarbeitung fremder ADS-B Nachrichten unterschieden.(vorgeschlagen in NUP1). In geographischen Regionen, in denen keine Radarabdeckung besteht, kann ADS-B-out als zuverlässiger Ersatz dienen, um eine Luftlagedarstellung zu generieren. In großen Teilen von Australien wird ADS-B bereits eingesetzt und auf die Errichtung teurer Radaranlagen verzichtet. Gegenüber dem konventionellen Radar bietet es zudem den Vorteil, dass Positionsdaten unabhängig von Entfernung oder Wetter bis zur maximalen Reichweite, je nach Flughöhe bis zur 400km, fast gleichbleibend ist, und zudem keine Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit der Radarantennen besteht. Die Updaterate der ADS-B Nachrichten beträgt 1 Hertz.

Im europäischen Raum fanden die ersten Untersuchungen zum potenziellen Nutzen von ADS-B und auf ADS-B basierenden Anwendungen für den Luftverkehr bereits Mitte der

90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts im Projekt NEAN statt, das mit den Projekten NUP, NUII und NUP II+ fortgesetzt wurde.

In Projekten wie AFAS, MA-AFAS oder Leonardo wurden Trajektorien Daten des FMS via ADS-B an den Boden übermittelt und für AMAN Planungsfunktionalitäten verwendet. Doch auch die Untersuchung von ADS-B in Anwendungen an Bord der Luftfahrzeuge deckte große Vorteile auf. Es zeigte sich, dass ADS-B Daten mittels der Darstellung der Positionsinformationen auf einem Cockpit Display of Traffic Information (CDTI) enorm zur Steigerung des Situationsbewusstseins des Piloten beitragen. Diese Ergebnisse wurden in parallelen Projekten wie MFF und vor allem den CRISTAL Flugversuchen des CASCADE Programms bestätigt.

Ausgehend von den Möglichkeiten die das CDTI auf Basis von ADS-B bot, begann in der Folge die Untersuchung von Applikationen zur Einhaltung eines definierten Abstandes zum umgebenden Verkehr, den sog. Airborne Separation Assurance System Applikationen, kurz ASAS (s. Kap. 3).

Das Ziel der ASAS-Anwendungen ist, die Delegation von Separationsaufgaben an den Piloten und damit das Lfz zu ermöglichen, um so eine Arbeitsentlastung des Lotsen zu erreichen. Dadurch können bei gleichem Sicherheitsniveau mehr Flugbewegungen durch den Lotsen zu gleicher Zeit verantwortet werden.

2.4 SES und SESAR

Nach Schätzungen von Eurocontrol belaufen sich die Gesamtkosten für Verspätungen, deren Ursachen im Flugverkehrsmanagement liegen auf Beträge, die sich in der Größenordnung von fast einer Milliarde Euro pro Jahr bewegen. Ebenso gravierend, wenn auch nicht exakt quantifizierbar sind die Auswirkungen zu bewerten, die aufgrund von Ineffizienzen durch nicht optimale Streckenführung entstehen.

Hauptgrund dieser Problematik ist der immer noch zersplitterte europäische Luftraum. In allen Ländern kontrolliert und koordiniert die jeweilige nationale Flugsicherung die Flugbewegungen. Der obere europäische Luftraum wird derzeit durch die nationalen Grenzen ihrer 27 Mitglieder bestimmt und von rund 50 Flugsicherungszentralen verwaltet. Die Strukturen im europäischen Luftraum sind bei Weitem nicht mehr zeitgemäß. Die Zersplitterung des Luftraums beeinträchtigt die Sicherheit und schränkt die Kapazitäten ein, was pro Jahr eine weitere Milliarde Euro an Betriebskosten verursacht.

Im Jahr 1999 wurde daher mit dem „Single European Sky“ (SES), dem einheitlichen europäischen Luftraum, eine Initiative ins Leben gerufen, die das Ziel hat, die Architektur des europäischen Air Traffic Managementsystems umfassend zu modernisieren und zu harmonisieren. SES verfolgt dabei einen gesetzessorientierten Ansatz, um die zukünftigen Anforderungen in Bezug auf Sicherheit und Kapazität zu erfüllen.

Die Hauptaspekte der legislativen Rahmenbedingungen beziehen sich auf:

- die Restrukturierung des europäischen Luftraums in Functional Airspace Blocks (FABs) als eine Funktion von Luftverkehrsströmen anstelle von territorial/hoheitlich aufgeteilten Sektoren.

- die Generierung zusätzlicher Kapazität und der Minimierung von Verspätungen sowie
- die übergreifende Effizienzsteigerung des europäischen Luftverkehrssystems

Im zweiten restriktiveren Paket der SES-Regulierungen (SESII, 2008) wurden die Performanceziele für das künftige Luftverkehrssystem festgeschrieben. Mit der Implementierung des SES werden

- die Erhöhung der Sicherheit um den Faktor 10
- die Steigerung der Kapazität um den Faktor 2-3
- die Reduzierung des Umwelteinflusses um 10% und
- die Verringerung der Air Traffic Management Kosten um 50%

angestrebt.

Um die Performanceziele zu erreichen, sollen die Flugsicherungen mehrerer Staaten in den neu geschaffenen FABs eng zusammenarbeiten.

Nach der Grundgesetzänderung zur Flugsicherungsreform im Mai 2009 steht dem Single European Sky aus Sicht der Bundesrepublik Deutschland nichts mehr im Weg. Demnach bleibt die Überwachung des Luftverkehrs über der Bundesrepublik hoheitlich in der Hand der bundeseigenen Deutschen Flugsicherung (DFS). Diese soll jedoch Aufgaben an ausländische Flugsicherungs-Organisationen delegieren können. Gemäß der neuen Aufteilung fällt der Luftraum der Bundesrepublik Deutschland zukünftig in den zentralen europäischen Luftraumblock FABEC und nimmt damit erneut eine zentrale Rolle im europäischen Luftverkehrssystem ein.

Die Umsetzung der Performanceziele soll mittels des Single European Sky ATM Research Programmes, kurz SESAR, erreicht werden. SESAR beinhaltet Forschung, Entwicklung und Implementierung in Bezug auf technische Unterstützungswerkzeuge und operationelle Detailkonzepte, die die Erreichung der SES Ziele bis zum Jahr 2020 unterstützen.

In der Definitionsphase (2005-2008) wurde der initiale SESAR Masterplan (neueste Version 2012 [SES05]) für das Flugverkehrsmanagement erstellt, der die technologischen Schritte und die Schwerpunkte der Modernisierung ermittelt, die für die Verwirklichung eines neuen Flugverkehrsmanagementkonzepts notwendig sind.

In der Umsetzungsphase (ab 2008) werden die neuen Ausrüstungen und Normen entwickelt, durch die mithilfe der SES-Regulierungsmechanismen die Umrüstung der bestehenden boden- und bordgestützten Systeme sowie ihre Interoperabilität mit außer-europäischen Systemen gewährleistet werden sollen. Die Errichtungsphase (ab 2014) besteht aus der großtechnischen Produktion, Beschaffung und Umsetzung der neuen Flugverkehrsmanagementinfrastruktur und der entsprechenden Luftfahrzeugausrüstung.

Das operationelle Zielkonzept wurde im Dokument „ATM Target Concept“ [SES07] niedergelegt. Es wurde während der Definitionsphase von SESAR entwickelt und im September 2007 veröffentlicht. Es beinhaltet das „Concept of Operations“, die Beschreibung von dessen Architektur und der einzusetzenden Technologien sowie der Berücksichtigung menschlicher Faktoren.

Die Kernmerkmale des Konzeptes bestehen in

- einem trajektorienbasierten Luftverkehrsmanagement
- einem dynamischen Network Operations Plan
- erweiterter Automatisierung zur Reduzierung der Arbeitslast der Lotsen
- neuen Separationsmodi
- einem systemweitem Informationsmanagement (SWIM) und
- der Integration des Flughafens in den ATM-Planungsprozess

Viele der Konzeptelemente sind aus den vorangegangenen Programmen bekannt und werden in SESAR weiter verfolgt und ausgebaut.

Das trajektorienbasierte Luftverkehrsmanagement fußt auf einer „4D Business Trajectory“ die darauf ausgerichtet ist, jede einzelne Flugbewegung so genau wie möglich nach den Wünschen des Luftraumnutzers (Position, Höhe und Zeit) auszuführen.

Die Flugsicherungen gewährleisten, dass die Trajektorie sicher, kosteneffizient und unter den durch Umweltaspekte gegebenen Beschränkungen ausgeführt wird. Dabei soll die Ursprungstrajektorie so wenig Änderungen und Einschränkungen wie möglich unterworfen sein. Nur im Falle unvorhergesehener Störungen wird der individuelle Flug der Optimierung der Ziele des Gesamtsystems untergeordnet.

Alle Trajektorien gemeinsam bilden den Network Operations Plan (NOP). Werden Änderungen am NOP nötig, sollen sie über einen kollaborativen Entscheidungsprozess abgestimmt werden.

Alle Beteiligten haben dabei zu jeder Zeit über SWIM Zugriff auf die Daten der präzisierten Trajektorien. Das SWIMnet stellt den Enabler für den übergreifenden CDM Prozess dar.

Der NOP muss ein ausgeglichenes Verhältnis von Nachfrage und Kapazität aufrechterhalten und die Konfliktfreiheit in der Planung sicherstellen. Er steht dabei im ständigen Austausch und Abstimmung mit den Airport Operations Plan (AOP), der die Planung jeweils eines Flughafens widerspiegelt.

In der Ausführung zählen zur Konfliktvermeidung ebenfalls neue Verfahren für die Gewährleistung des Abstandes zwischen den Luftfahrzeugen, wodurch neben der Sicherheit, auch Kapazität und Effizienz gesteigert werden können. Dabei bleibt der Mensch das zentrale Entscheidungsorgan. Fluglotsen und Piloten sollen jedoch durch neue, automatisierte Funktionen unterstützt werden, die ihre Arbeitslast verringern und komplexe Entscheidungsabläufe bewältigen.

Die Bedeutung der Prozesse und Abläufe am Flughafen und in der TMA für den reibungslosen Ablauf eines europäischen Gesamtsystems wurde lange Zeit kaum berücksichtigt. Als Nadelöhr und Verbindungspunkt zwischen Luftraum und Boden verdient vor allem die Optimierung der Nutzung des Runwaysystems besondere Aufmerksamkeit.

Der SESAR Masterplan definiert eine Roadmap entlang 8 sog. Lines of Change, die in 5 ATM Service Levels mit zunehmenden Integrations-, Ausrüstungs und Automatisierungsgrad unterteilt ist.

Die Lines of Change umfassen:

- LOC#1 Information Management
- LOC#2 Moving from Airspace to Trajectory Based Operations
- LOC#3 Collaborative Planning Using the Network Operations Planner
- LOC#4 Managing the ATM Network
- LOC#5 Managing Business Trajectory in Real Time
- LOC#6 Collaborative Ground and Airborne Decision Tools
- LOC#7 Queue Management Tools
- LOC#8 New Separation Modes
- LOC#9 Independent Cooperative Ground and Airborne Safety Nets
- LOC#10 Airport Throughput, Safety and Environment

Obwohl die Wirkungskette für das Thema der vorliegenden Arbeit in LOC8 ihren Ursprung hat (Focus Enroute), ist die dadurch angestrebte optimierte Runwaynutzung der LOC#10 zuzuordnen.

Zur Steuerung der SESAR-Entwicklungsphase hat die Europäische Union im Februar 2007 das SESAR Joint Undertaking (SJU) zur Koordinierung aller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des SESAR-Masterplans gegründet. Das SJU vereint die Europäische Kommission, Eurocontrol, die Vertreter der europäischen Flugsicherungen, Flughäfen, Flugzeug- und Avionikherstellern sowie Hersteller von bord- und bodenseitigen Kommunikations- und Überwachungseinrichtungen.

Der Weg zu einem einheitlichen zukunftsfähigen europäischen Luftverkehrssystem ist lang. Er hat jedoch mit SES und SESAR durch die Einbeziehung aller Beteiligten und deren schriftlich dokumentierten Willen sich den gesteckten Zielen zu verschreiben mehr als je zuvor eine gute Chance tatsächlich vollendet werden zu können.

Kapitel 3

ASAS im Kontext kooperativen Luftverkehrsmanagements

Airborne Separation Assistance Systems (ASAS) ermöglichen die Separation eines Luftfahrzeugs von dem es umgebenden Verkehr mittels Onboard-Applikationen verschiedener Ausprägung. Der Anwender der ASAS-Applikation ist der Pilot. ASAS entfaltet seinen Nutzen nur in einem kooperativen Umfeld, das geprägt ist durch operativen Datenaustausch und Verfahren, die auf einer Umverteilung der Aufgaben und Verantwortlichkeiten zwischen Lotse und Pilot basieren. Enabler für ASAS-Applikationen ist die Datenübertragung via ADS-B.

Auf der Suche nach Mitteln und Wegen, den zunehmenden Kapazitätsengpässen im Luftraum zu begegnen, wurde in der Vergangenheit das Potenzial einer Kapazitätssteigerung des Luftraums durch Reduzierung der Arbeitslast der Lotsen untersucht. Die Verringerung der Arbeitslast sollte durch die Delegation von Separationsaufgaben an die Piloten erreicht werden.

Erste Ergebnisse wie die aus dem Projekt Emerald [EC00] aus den Jahren 1997-1998 bestätigten diese Hypothese und zeigten die prinzipielle Umsetzbarkeit der entwickelten Verfahren. Es folgten zahlreiche weitere Studien, die das ASAS-Konzept untersuchten und die Entwicklung von Verfahren und Funktionen vorantrieben.

Zusätzlich zur angestrebten Steigerung der Kapazität sollte durch die Anzeige des umgebenden Verkehrs auf dem Cockpit Display of Traffic Information (CDTI) das Situationsbewusstsein der Piloten verbessert und somit auch ein Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit geleistet werden. Die Einführung des CDTIs hat ihren Ursprung im Traffic Collision Avoidance System (TCAS), welches ursprünglich nur zur kurzfristigen Kollisionsvermeidung dienen sollte. Die Piloten nutzten das Display des TCAS in der größten Anzeigereichweite jedoch häufig dazu, sich ein Bild vom umgebenden Verkehr zu machen.

3.1 ASAS Definition und Kategorisierung

Der Begriff ASAS wurde bereits im Jahre 1994 vom französischen Centre d'Études de la Navigation Aérienne (CENA) eingeführt. Erst im Jahr 2001 verfassten die Federal Aviation Administration der USA (FAA) gemeinsam mit der Eurocontrol das Dokument

“Principles of Operation of ASAS“ [POA01] in dem nach Betrachtung verschiedener Aspekte wie operationeller Verfahren, Human Factors, Flugzeugsysteme, Schlüsseltechnologie, Nutzerperspektiven und Implementierung eine Unterteilung von ASAS-Applikationen in die vier folgenden Kategorien vorgenommen wurde.

- Airborne Traffic Situational Awareness Applications (ATSA)
- Airborne Spacing Applications (ASPA)
- Airborne Separation Applications (ASEP)
- Airborne Self-separation Applications (SSEP)

Eine Applikation wird bestimmt durch mehrere Applikationselemente. Zu diesen gehören die Capabilities, z.B. die Fähigkeit eines ASAS-Aircraft einen vorgegebenen Abstand zum vorausfliegenden Lfz einzuhalten, die ASAS-Funktion, z.B. die eigentliche Berechnung der erforderlichen Geschwindigkeiten oder Headings sowie die Umgebung in der beides angewendet wird. Hierzu zählt z.B. die Unterscheidung von dicht oder weniger dicht beflogenen Luftraum, oder Non-Radar-Airspace (NRA) aber auch die Aufteilung der Verantwortlichkeiten zwischen Lotse und Pilot. Abbildung 3.1 zeigt die für die oben genannten vier Hauptapplikationen angewandten Unterscheidungsmerkmale.

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse des Projektes EMERALD entschied sich Eurocontrol, im Rahmen der CARE Programme zur Gründung eines CARE-ASAS Bereiches, da aufgrund zu erwartender Forschungsunternehmungen die Notwendigkeit für ein koordiniertes kooperatives Vorgehen innerhalb Europas und die Bildung einer einheitlichen Sicht in Bezug auf ASAS-Applikationen gesehen wurde.

Im Jahr 2002 veröffentlichte CARE-ASAS die Beschreibung eines „First Package of Ground Surveillance / Airborne Surveillance (GS/AS) Applications“ welches die Applikationen beinhaltet, die man als geeignet für eine Implementierung innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre erachtete.

Um die operationelle Implementierung des Package I zu unterstützen, wurde im Jahr 2003 eine sog. Requirements Focus Group (RFG) gegründet, die sich mit der Harmonisierung der Applikationen sowie der Formulierung von Safety-, Performance- und Interoperability-Anforderungen befassen sollte. Die für Package I ausgewählten Onboard-Applikationen konzentrieren sich auf den operationellen Nutzen der Verwendung von ADS-B Daten und gehören ausschließlich der ersten beiden Kategorien ATSA und ASPA an.

Die ebenfalls darin enthaltenen Ground Surveillance Applikationen unterstützen den Lotsen mittels ADS-B bei der Überwachung des Verkehrs in Non-Radar Airspace (ADS-B-NRA), dienen der Verbesserung der Situational Awareness in Radar Airspace auch in der TMA (ADS-B-ACC bzw. ADS-B-TMA) und enthalten Funktionen die ausschließlich für den Boden bestimmt sind (ADS-B-APT und ADS-B ADD).

















<p>ATSA</p> <p> Traffic Situational Awareness</p> <p> Verantwortung für Separation</p> <p> CDTI</p> <p>Σ keine</p> <p> High o. Low Density Controlled Aispace with TMA</p>	<p>ASPA</p> <p> Traffic Situational Awareness Ausführung Abstandseinhaltung zu Target</p> <p> Verantwortung für Separation</p> <p> CDTI oder CDTI + Folge ASAS SPD + Folge ASAS HDG</p> <p>Σ Pilot oder ASAS SPD Funktion + ASAS HDG Funktion</p> <p> High o. Low Density Controlled Aispace with TMA</p>
<p>ASEP</p> <p> Traffic Situational Awareness Umfliegen der Trajektorien zugewiesener Targets Verantwortung für Separation</p> <p> Monitoring</p> <p> CDTI + Folge ASAS SPD + Folge ASAS HDG + Folge ASAS ALT</p> <p>Σ Separation Funktionen + Collision Avoidance Funktionen + ...</p> <p> High o. Low Density Controlled Aispace ohne TMA</p>	<p>SSEP</p> <p> Traffic Situational Awareness Umfliegen der Trajektorien aller LFZ Verantwortung für Separation</p> <p> Monitoring</p> <p> CDTI + Folge ASAS SPD + Folge ASAS HDG + Folge ASAS ALT</p> <p>Σ Separation Funktionen + Collision Avoidance Funktionen + ...</p> <p> High o. Low Density Controlled Aispace ohne TMA, NRA</p>

Abbildung 3.1: ASAS-Kategorien

Die Airborne Surveillance Applications unterteilen sich in

- ATSA-SURF Erweitertes Verkehrssituationsbewusstsein am Flughafen (Boden)
- ATSA-AIRB Erweitertes Verkehrssituationsbewusstsein im Flug
- ATSA-S&A Visuelle Unterstützung für „See and Avoid“ (kein ATC Service)
- ATSA-SVA Erweiterte Sichtanflüge - Folgen eines vorausfliegenden Lfz
- ASPA-S&M Sequencing and Merging - Sequenzbildung und Zusammenführen von Verkehrsströmen
- ASPA- ITP In Trail Procedures - Folgen in Non-Radar Airspace und
- ASPA-C&P Crossing and Passing - neue Lotsenanweisungen und Verfahren

Applikationen, die nicht dem obenstehenden Umfang angehören, sind Gegenstand weiterer ASAS-Packages (Package II und III).

Package II beinhaltet neben erweiterten Applikationen aus Package I auch ASEP Applikationen und SSEP-Applikationen, wobei sich letztere auf einen Low Density Airpace beschränken. Package III umfasst neben Erweiterungen zu den ersten drei Kategorien auch SSEP im High Density Airspace.

Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit sind die ASPA S&M Applikationen, die im Zusammenhang mit den lateralen ASAS-Manövern stehen (s. Abb. 3.2). Diese sind untergliedert in

- Remain Behind
- Heading then Remain Behind
- Merge Behind und
- Heading then Merge Behind

Remain Behind bezeichnet das Manöver in dem ein Lfz dem anderen in einem manuell oder automatisch geregelten zeitlichen oder örtlichen Abstand entlang der gleichen Trajektorie folgt. Bei Initiierung weichen gewünschter und tatsächlicher Abstand nur wenig voneinander ab. Das „Remain Behind“ kann im Bezug auf eine festgelegte Route oder im sog. „Trackfollowing“ ausgeführt werden. Bei Merge Behind konvergieren die Trajektorien der beiden Lfz. Der vorgeschriebene Abstand muss an einem definierten Punkt, dem sog. „Merging Point“ mittels Geschwindigkeitsänderungen des folgenden Aircraft hergestellt sein. Daran schließt sich automatisch ein „Remain Behind“ Manöver an. Die beiden „Heading then“ Applikationen verbinden das Manöver mit einem vorausgehenden Ausweichvektor und können eingesetzt werden, wenn die Separationsherstellung allein auf Basis von Geschwindigkeitsrücknahme unmöglich wird.

In der vorliegenden Arbeit finden nur die ASPA-S&M „Remain Behind“ und „Merge Behind“ Manöver in der TMA, also einer Umgebung mit hoher Verkehrsdichte, Anwendung. Die Verantwortlichkeit der Überwachung der Separation verbleibt beim Lotsen.

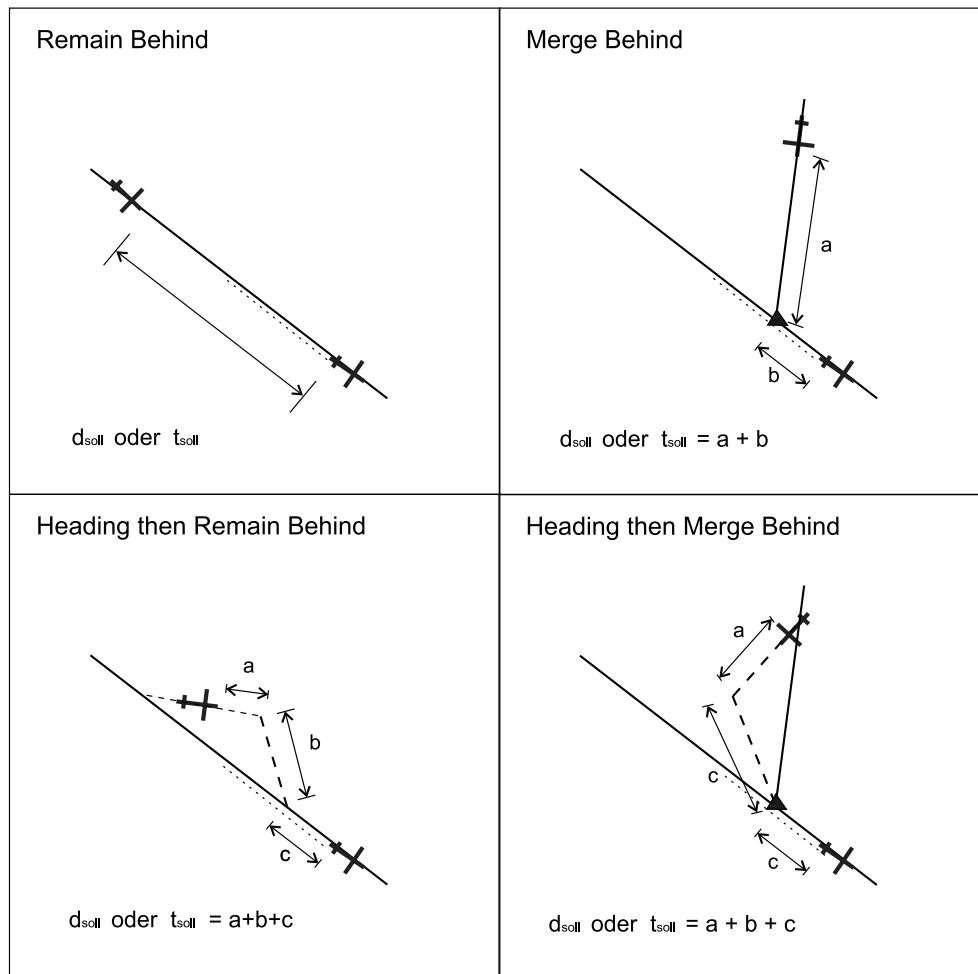


Abbildung 3.2: Laterale ASAS Sequencing & Merging Manöver

Die Flugzeuge besitzen die Fähigkeit einen vorgegebenen zeitlichen Abstand zu einem sog. Target Aircraft durch Berechnung der erforderlichen Geschwindigkeit herzustellen. Diese ASAS-Applikation kann dem ASAS Package I zugeordnet werden, obwohl bei der Paketierung kein expliziter Fokus auf die TMA gelegt wurde.

3.2 Erwarteter Nutzen

Die Verwendung von ASAS adressiert im Wesentlichen zwei Herausforderungen, die in wechselseitiger Beziehung zueinander stehen.

ASAS kann dazu beitragen, die Sicherheit der Luftverkehrsabwicklung zu erhöhen. Dies geschieht, indem die Arbeitslast der Lotsen durch die Delegation von Separationsaufgaben an den Piloten gesenkt (reduzierte Anzahl taktischer Instruktionen und Funkkommunikation derselben) und somit die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler in Hochlastsituationen verringert wird. Dies gilt sowohl im Enroute-Bereich bei der Verwendung von Crossing und Passing Anwendungen zur Kollisionsvermeidung als auch in der TMA bei Sequencing-Anwendungen in Bezug auf das Risiko von Separationsunterschreitungen.

Darüberhinaus wird durch das mittels Verkehrsanzeige im Cockpit geschaffene Situationsbewusstsein ebenfalls ein Beitrag zur Sicherheit geleistet, da die Monitoring-Aufgabe von mehreren Personen ausgeführt wird. Voraussetzung ist allerdings, dass die Verantwortlichkeiten genau festgelegt sind, um das Risiko des gegenseitigen sog. „Overtrustings“ zu vermeiden.

Der Sicherheitszuwachs, der an dieser Stelle beim Lotsen entsteht, kann jedoch auch in einen Zuwachs an Kapazität umgewandelt werden, da der Lotse aufgrund der verringerten Arbeitslast bei gleichbleibendem Sicherheitsniveau mehr Lfz zu überwachen in der Lage ist. Dies gilt jedoch hauptsächlich für den Enroute-Bereich.

Am Flughafen ist die Kapazität, also die Anzahl abwickelbarer Flugbewegungen nicht hauptsächlich durch die kognitive Kapazität der Lotsen beschränkt, sondern durch die maximal mögliche Lande- und Startrate der Lfz. Diese hängt einerseits von den herrschenden Wind- und Wetterfaktoren ab, die die Anfluggeschwindigkeit und die Runwaybelegungszeit bestimmen, auf welche aber mittels ASAS kein Einfluss genommen werden kann. Andererseits spielen aber auch die Separationsminima und die Genauigkeit, mit der die jeweiligen Separationswerte hergestellt werden können eine große Rolle.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz zur Erhöhung der Kapazität beruht auf dem Effekt, der sich aus der Reduzierung der Unsicherheiten der Ankunftszeit bzw. der Differenz aus zwei aufeinanderfolgenden Ankunftszeiten ergibt. Lässt sich die Genauigkeit der Zeitspanne, die zwischen dem Passieren der Landeschwelle zweier aufeinanderfolgender Lfz vergeht (Inter-Arrival Time) mittels ASAS erhöhen, ermöglicht dies die Reduzierung des zeitlichen Puffers und damit eine enger gestaffelte Planung und mit deren Umsetzung auch eine Steigerung des Durchsatzes der Landungen. Mit der höheren Ausführungsgenauigkeit nimmt außerdem die Anzahl an Missed Approaches aufgrund von Staffellungsunterschreitungen ab, was sich positiv auf die Effizienz im Sinne von Kapazitätsnutzung und Verspätungssituation auswirkt.

Der sich durch geringere Sicherheitspuffer ergebende kapazitätssteigernde Effekt würde sich theoretisch auch beim Abflug bemerkbar machen. Hier allerdings stellen häufig die

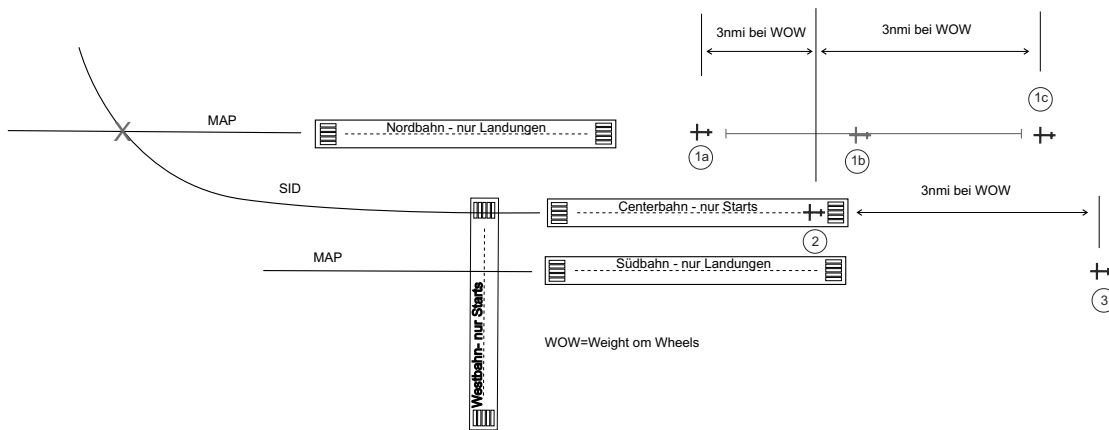


Abbildung 3.3: Koordinierter Anflug bei Runwayabhängigkeiten

durch die Lotsenkapazität begrenzten maximalen Übergaberaten an die Enroute-Sektoren (MDIs) den limitierenden Faktor für die Kapazität dar, welche die Departurekapazität stromaufwärts, also bereits auf der Schwelle einschränken.

Der Effekt höherer Ausführungsgenauigkeit wirkt sich auch bei Anflügen auf zwei parallel versetzte Landebahnen aus. Für die Steigerung der Kapazität in einem Bahnsystem mit Abhängigkeiten untereinander ist eine Koordinierung der Anflüge zwischen zwei Landebahnen von größter Wichtigkeit.

Der volle Nutzen dieser Maßnahme für den Gesamtdurchsatz von Starts und Landungen entfaltet sich jedoch nur, wenn eine gekoppelte Arrival/Departureplanung existiert, die den optimalen Abstand zwischen zwei landenden Lfz derart berechnet, dass ausreichend Zeit für einen dazwischen stattfindenden Start bleibt.

Das folgende Beispiel des Flughafens Frankfurt Main (s. Abb. 3.3) soll die Situation verdeutlichen. Aufgrund von Wirbelschleppenstaffelungen im Anflug und während eines Missed Approaches existieren Abhängigkeiten zwischen den Start und Landebahnen, obwohl die Landebahnen selbst als „Independent Parallel Runways“ gelten.

Die von der Centerbahn aus startenden Lfz kreuzen bei Nordabflügen im Steigflug den Missed Approach Path der auf der Nordbahn landenden Lfz. Aus diesem Grund darf ein Start nur durchgeführt werden, wenn sich die Landung auf der Nordbahn entweder weniger als 1 nmi oder mehr als 7 nmi von der Landeschwelle befindet.

Eine dem startenden Lfz auf der Centerbahn folgende Landung auf der Südbahn muss aufgrund eines möglichen Missed Approaches auch die entsprechende Mindeststaffelung zum startenden Lfz einhalten, womit sich ein indirekter Zusammenhang der beiden Landebahnen ergibt. Ist die Landung auf der Südbahn zu früh oder die Landung auf der Nordbahn zu spät, kann der Start nicht stattfinden und Kapazität wird verschwendet.

Bei einer gekoppelten Arrival und Departureplanung entsteht neben der gesteigerten Effizienz außerdem ein positiver Effekt in Bezug auf die Umwelt, da durch die genaue Einhaltung der Inter-Arrival Times genau geplante Lücken zwischen den Arrivals geschaffen werden, welche dann sofort von den startenden Lfz genutzt werden. Das Warten am Startbahnkopf auf eine ausreichend große Lücke und der damit entstehende zusätzliche Treibstoffverbrauch entfallen.

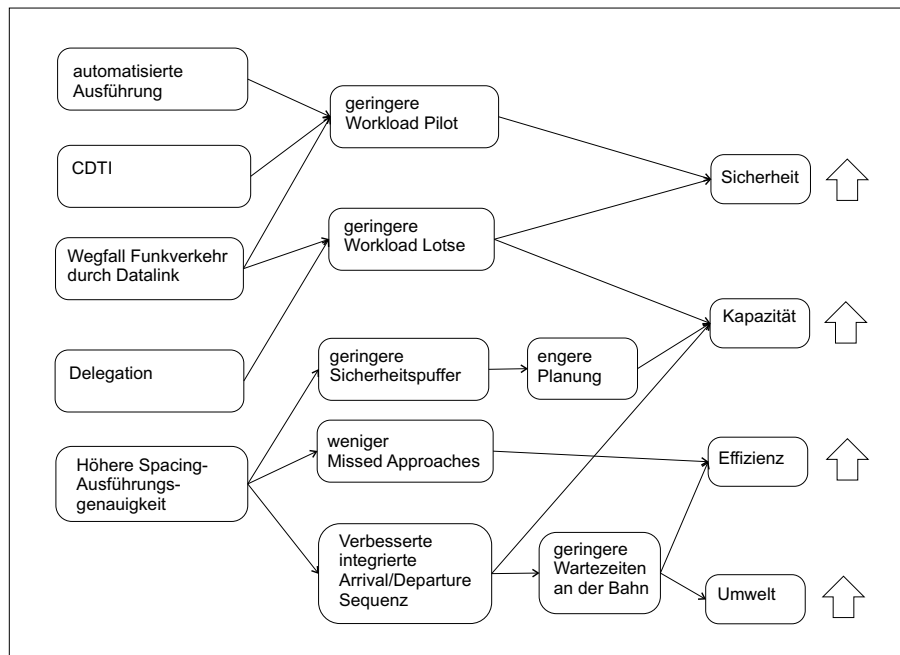


Abbildung 3.4: ASAS Nutzen-Wirkungskette

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ASAS dazu beiträgt, den zukünftigen Herausforderungen in Bezug auf Sicherheit, Kapazität, Effizienz und Umwelt mittels Aufgabendelegation und Automation gleichzeitig zu begegnen, wie es der SESAR Masterplan [SES05] vorsieht.

Abbildung 3.4 fasst die Nutzen-Wirkungskette von ASAS-Applikationen und unterstützender Datalink-Funktionalität zusammen.

3.3 Stand der Forschung

Vergangene Forschungsprojekte die sich der ASAS-Thematik annahmen, untersuchten die Realisierbarkeit von ASAS-Applikationen enroute, flughafennahen Sektoren (ETMA) und auch im direkten Flughafennahbereich (TMA). Bei der Entwicklung und Validierung von ASAS-Verfahren muss die operationelle Durchführbarkeit hinsichtlich möglicher Beeinträchtigungen der Sicherheit auf Bordseite wie auf Bodenseite gleichermaßen überprüft werden. Wenn sich für Lotsen oder Piloten durch neue Prozeduren zu hohe Belastungen ergeben oder durch die Delegation der Separationsaufgaben zu starke Verschiebungen der Belastung in Richtung der Piloten resultieren, wäre es nicht sinnvoll ein solches Verfahren einzuführen. Letztendlich steht und fällt die Einführung jeglicher Neuerungen in diesem Bereich mit der Akzeptanz der Lotsen.

Der Fokus der bisherigen Forschung lag neben Human Factors Aspekten darüber hinaus auch auf der Validierung bezüglich direkten Nutzens für die Verkehrsabwicklung in Bezug auf Effizienz und Kapazität, die nicht nur aus einer Reduzierung der Arbeitsbelastung heraus entstehen, sondern Verfahren und Technologie direkt innewohnen.

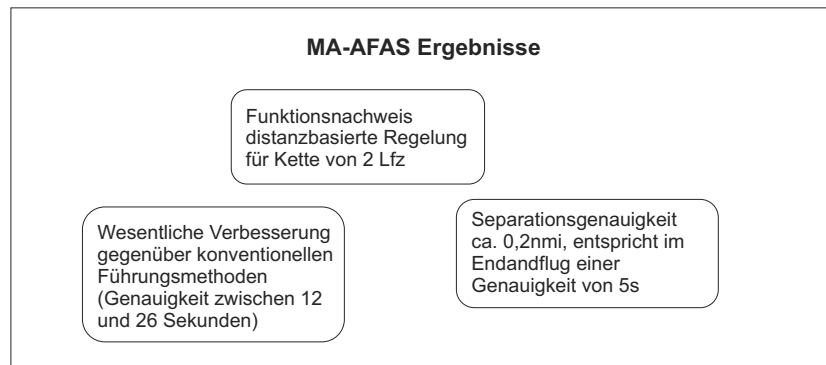


Abbildung 3.5: MA-AFAS Ergebnisse

MA-AFAS (2000-2003, 5. EU Rahmenprogramm) [MAA03a] [MAA03b] verfolgte das Ziel, die auf europäischer Ebene erzielten Forschungsergebnisse im Bereich des Air Traffic Management zusammenzuführen und in die Praxis umzusetzen, d.h. operationelle ATM Verfahren zu entwickeln, mit denen man mittelfristig der Kapazitätsproblematik von Großflughäfen begegnen konnte. Dieses Ziel sollte in MA-AFAS hauptsächlich durch die Entwicklung und Untersuchung bordseitiger Komponenten erreicht werden.

In Bezug auf ASAS wurden in Simulationen und Flugversuchen neben mehreren ATSA-Applikationen auch ASPA-S&M und ASPA-C&P Applikationen für eine Kette von 2 Lfz (Lead Aircraft und Trailing Aircraft) getestet.

ASAS-Instruktionen wurden als Textnachricht via Datalink versendet oder über Funk kommuniziert. Das mit 4D-FMS ausgerüstete Lfz verarbeitete diese und berechnete daraus adäquate Manöver. Die zugehörigen Geschwindigkeits- und Headinganweisungen wurden nach Bestätigung durch den Piloten automatisch ausgeführt oder aber manuell umgesetzt. Die Ergebnisse der drei Flugversuche (zwei davon mit simuliertem Target Aircraft) zeigten, dass alle ASPA-C&P Manöver erfolgreich durchgeführt werden konnten. Bei den ASEP S&M Manövern traten zu Beginn Probleme bei „Merge Behind“ und „Remain Behind“ Applikationen auf, die im Laufe der Versuche beseitigt werden konnten. Zum Ende der Versuchsreihe erreichte das Trailing Aircraft während eines Manövers mit einer Geschwindigkeitsänderung des Lead Aircrafts von 10 Knoten eine Separationsgenauigkeit von $\pm 0,25$ nmi. Während der Flugversuche mit zwei realen Lfz konnte aufgrund eines Fehlers in der Geschwindigkeitsberechnung nur eine Separationsgenauigkeit von 0,4 nmi erreicht werden. Nach den Angaben im Bericht konnte dieser Fehler später jedoch auf 0,2 nmi verringert sowie auch die Anzahl kommandierter Geschwindigkeitsänderungen reduziert werden.

Nach Umrechnung auf Basis typischer Anfluggeschwindigkeiten entspricht dies einem zeitlichem Fehler von etwas über 5 Sekunden. Dies stellt eine deutliche Verbesserung gegenüber den mit konventionellen ATC Methoden erzielbaren Werten dar, mit welchen eine Genauigkeit von lediglich 12 [LC90] bis 26 Sekunden [DW86] erreicht werden kann.

Das Projekt **NUP II** (2001-2005, TEN-T) verfolgte das Ziel der bodenseitigen, operationellen Untersuchung von ADS-B basierten Verfahren. Es vereinte ASAS-Analysen in den Bereichen ASTA-SURF, ATSA-ADD, ASPA-ITP für den ozeanischen Luftraum sowie ATSA-AIRB und ASPA-S&M Anwendungen in der TMA. Letztere konzentrierten sich auf Advanced Visual Approach (ASTA-VSA) und Airborne Approach Spacing

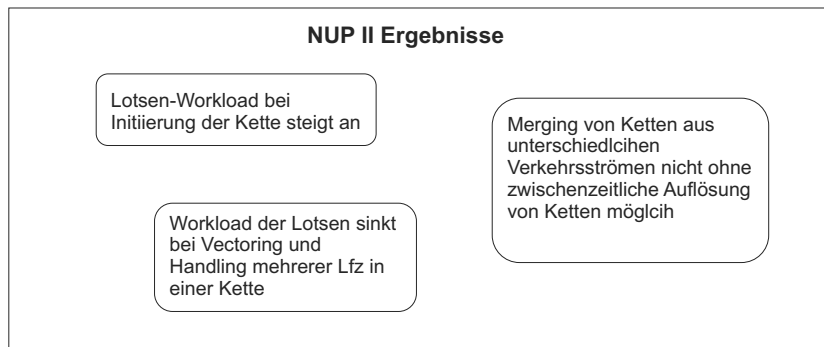


Abbildung 3.6: NUP II Ergebnisse

(ASEP-S&M) im Frankfurter Luftraum, als Beispiel für einen flughafennahen Luftraum mit hoher Verkehrsdichte.

Die Ergebnisse zeigten einen merklichen Anstieg der Lotsen-Arbeitsbelastung beim Initiieren von Sequenzen, deckten aber gleichzeitig großes Potenzial in der Reduzierung der Arbeitsbelastung während des Handlings und Monitorings bestehender Ketten von Trailing Aircraft auf. Einige Feeder Lotsen bewerteten die Zusammenführung der vom Pickup-Lotsen gebildeten einzelnen Ketten aus Nordrichtung mit Ketten aus Südrichtung als problematisch, da sie keinen direkten Einfluss auf das letzte Trailing Aircraft einer Kette ausüben konnten, welches in der Folge aber nach dem letzten Turn auf das Final als Target Aircraft für die folgende Kette von Lfz aus der entgegengesetzten Richtung dienen sollte.

Im Projekt **Gate-to-Gate** (2002-2006) [G2G07] sollte ein operationelles Konzept entwickelt werden, das alle Flugphasen vom Start am Vorflughafen bis zur Ankunft am Zielflughafen abdeckt. Das Konzept sollte mittels Schnellzeit- und Realzeitsimulationen in Bezug auf dessen Einfluss auf Sicherheit, Kapazität und Effizienz validiert werden. Das Projekt war untergliedert in die drei Arbeitspakete Departure, Enroute und Arrival.

Letzteres beinhaltete die Untersuchung von ASPA S&M Verfahren für den Einsatz im erweiterten Flughafennahbereich. Das Anflug-Arbeitspaket befasste sich darüberhinaus im selben Kontext auch mit der Weiterentwicklung des Arrival Managers, der Verbesserung von Lotsenarbeitsplätzen und Arbeitsmethoden sowie mit der besseren Koordinierung des Verkehrs zwischen ETMA und TMA.

Der erwartete Nutzen der Anwendung von ASPA S&M innerhalb des Projektes bestand darin, den erwarteten künftigen Verkehrszuwachs besser handhaben zu können. ASPA S&M sollte in den Simulationen daher dazu dienen, die Lotsen beim Arrivalmanagement innerhalb der ETMA, also vor Erreichen des Einflughauptpunktes in einer realistischen Arbeitsumgebung zu unterstützen. Zu diesem Zweck wurde die ETMA von Rom ausgewählt. In Bezug auf das Ziel der Operabilität der ASAS-Applikationen zeigten die Simulationen einen Rückgang der Arbeitsbelastung des ausführenden Lotsen, sowohl in den Enroute als auch in den Approach Phasen. Die Verteilung der Arbeitsbelastung zwischen ausführenden Lotsen und Planungslotsen konnte durch den Einsatz von ASAS gleichmäßiger verteilt werden, wobei ein leichter Anstieg der Arbeitsbelastung beim Planungslotsen zu verzeichnen war.

Die Anwendbarkeit der ASAS-Verfahren erhielt insgesamt eine positive Bewertung, wobei

darauf hingewiesen wurde, dass die ASAS-Verfahren so früh wie möglich im Flugverlauf initiiert werden sollten, um möglichst effektiv eingesetzt werden zu können.

Beim Anflug von mehreren Lfz-Ketten aus unterschiedlichen Richtungen, die die selbe Landebahn anfliegen wurde angemerkt, dass in diesem Fall nur sehr kurze Ketten von bis zu maximal drei Lfz gebildet werden konnten, um den Verkehrsfluss aus den unterschiedlichen Himmelsrichtungen abwechselnd zu einem einzigen Anflugstrom zu verflechten. Der Nutzen der Kette an dieser Stelle wurde hierbei in Frage gestellt.

Hinsichtlich der Sicherheit lieferte die Untersuchung positive Ergebnisse in dem Sinne, als bei der Anwendung von ASAS weniger Separationsunterschreitungen zu verzeichnen waren. Generell unterstützte das Vorhandensein eines Arrival Managers die Bildung von durch ASAS separierten Sequenzen, jedoch waren die AMAN Anweisungen in einigen Fällen noch unvereinbar mit der beabsichtigten ASAS-Funktion, was zeigt, dass AMAN und ASAS beim Anflug auf die TMA besser aufeinander abgestimmt werden müssen.

Die Lotsen bemerkten ebenfalls, dass bei der Anwendung von „Heading then Merge“ und „Heading then Remain“ Applikationen das Situationbewusstsein negativ beeinträchtigt wurde, was den Schluss zulässt, dass diese Applikationen für eine Anwendung in der ETMA und der TMA nicht zum Einsatz kommen sollten.

Dies unterstreicht wiederum die Aussage, dass ASAS-Manöver möglichst früh initiiert werden sollten, um Abstandsherstellung allein mittels Geschwindigkeitsregelung, ohne das Fliegen von Ausweichpfaden, bewältigen zu können. Dies würde allerdings eine Neustrukturierung einiger Sektoren erfordern, da diese oft zu kurz oder zu klein sind und nicht ausreichend Zeit bleibt, um die Sequenzen mittels ASAS manuell aufzubauen.

Die Ergebnisse bezüglich der Lotsenakzeptanz ermutigten eindeutig dazu, die Einführung von ASAS-Applikationen im erweiterten Flughafennahbereich weiter zu verfolgen. Die ASPA S&M Applikationen in Verbindung mit der Verwendung des AMAN wurden von allen Lotsen angenommen und häufig angewendet, insbesondere wenn Datalink zur Verfügung stand. Die Phraseologie für die Kommunikation via Funk wurde jedoch in vielen Fällen als zu komplex bewertet und zur Überarbeitung vorgeschlagen.

Eine quantitative Bewertung des Nutzens der ASAS-Applikationen fand im Rahmen des Projektes nicht statt.

Im Jahr 2003 erkannten die ICAO und die ihr angehörenden Staaten ADS-B als nutzbringende Technologie zur Verbesserung der Sicherheit und Steigerung der Kapazität an. Sie einigten sich darauf, die Implementierung von ADS-B und der zu dessen Nutzbarmachung entwickelten Applikationen voranzutreiben. Daraufhin wurde im Jahr 2004 das Programm **CASCADE** (Cooperative ATS through Surveillance and Communication Applications Deployed in ECAC) der Eurocontrol ins Leben gerufen, welches die Validierung und Implementierung der Applikationen aus Package I sowie weiterer Datalink-Anwendungen um Ziel hatte.

ASAS-S&M, angewendet auf den Flughafennahbereich, wurde darin als die vielversprechendste der im Rahmen von CASCADE untersuchten Applikationen bewertet.

Das CASCADE Programm [EUR08] beinhaltete drei Versuchsreihen, die zur Validierung unterschiedlicher Aspekte der ASAS S&M Anwendungen herangezogen wurden. Dazu zählten eine Realzeitsimulation im Luftraum Frankfurt mit sehr hoher Verkehrslast

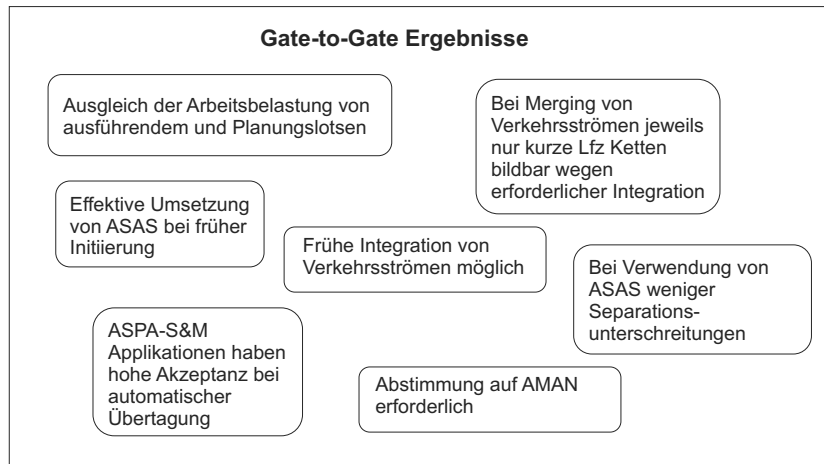


Abbildung 3.7: Gate-to Gate Ergebnisse

(RTS Frankfurt, 2004), eine Serie von Fasttimesimulationen in einem konfigurierbaren Luftraum, ähnlich der Pariser ETMA (CRISTAL Paris, 2005-2007) sowie mehrere Realzeitsimulationen und Prototyping-Sessions innerhalb des Projektes CoSpace (bis 2006).

Während sich CRISTAL Paris hauptsächlich darauf konzentrierte, den wirtschaftlichen Nutzen von ASAS zu validieren sowie Kapazitäts- und Effizienzeffekte nachzuweisen, untersuchten RTS Frankfurt und CoSpace darüberhinaus auch die generelle Einsatzfähigkeit von ASAS in verschiedenen operativen Umgebungen sowie die damit verbundenen Sicherheitsaspekte.

Während die „Remain Behind“, „Merge Behind“ und „Heading then Merge Behind“ Applikationen in der RTS Frankfurt generell angenommen und positiv bewertet wurden, äußerten die Lotsen jedoch Bedenken bezüglich der Anwendbarkeit in dichtem Verkehr, da sie die Manöver an sich, als auch deren Phraseologie als zu komplex empfanden. Die bei der aktuellen Luftraumstruktur existierenden Kreuzungen mit den Departurerouten verhinderten oft die Bildung längerer Ketten. Eine Verbesserung des Nutzens sahen die Lotsen für den Fall der Existenz eines gekoppelten Arrival- und Departuremanagers, der bereits im Vorfeld ausreichend große Staffellingsabstände an der richtigen Stelle der Kette herzustellen in der Lage ist.

Des Weiteren wurde angemerkt, dass eine geographische Verlängerung der Anflugsektoren weiteres Verbesserungspotenzial birgt, da den Lotsen so mehr Zeit bleibt, um die Sequenzen herzustellen.

Die ASAS-Funktion stützte sich hier auf einem abstandsasierten Regler. Fehlende theoretische Überlegungen im Vorfeld führten dazu, dass die Lotsen erst während der Versuche anmerkten, dass es sinnvoll wäre, anstatt eines Abstandsreglers einen reinen zeitbasierten Regler zu wählen, da sich bei letzterem bei langsamer werden des Target Aircraft der Abstand des Trailing Aircraft automatisch verringert, ohne dass eine neue Separationsanweisung gegeben werden muss. Insgesamt konnte kein Rückgang des Funk-sprechverkehrs verzeichnet werden.

Die Ergebnisse legen nahe, dass zusätzliche Höhenweisungen, die gegeben wurden um dem Abflugstrom mit den gebildeten Ketten auszuweichen, den positiven Effekt des

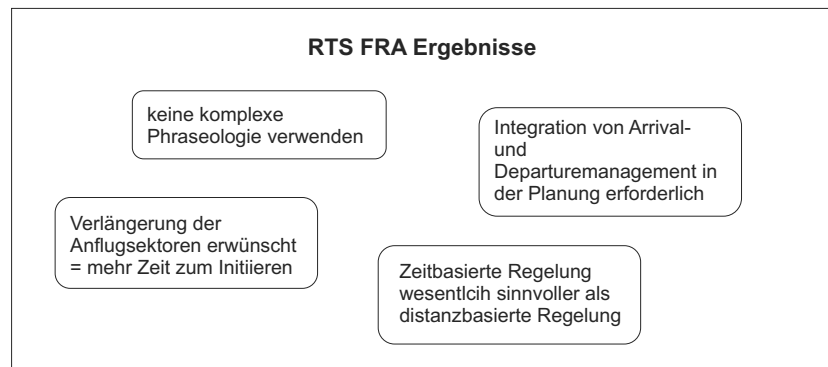


Abbildung 3.8: RTS FRA Ergebnisse

Wegfalls von Vectoringanweisungen von Lfz im ASAS-Spacing wieder kompensierten. Unter Gesichtspunkten der Trajektorieneffizienz ist dies zusätzlich als negativ zu bewerten. Aufgrund der gleichbleibenden Anzahl der über Funk gegebenen Anweisungen konnte kein Rückgang in der Arbeitsbelastung der Lotsen festgestellt werden, der auf eine Kapazitätserhöhung durch gestiegene Lotsenverfügbarkeit oder eine daraus abgeleitete Erhöhung der Sicherheit schließen ließe.

Das Projekt CRISTAL untersuchte die Auswirkungen von ASAS S&M Applikationen in Bezug auf Kapazität und Effizienz. In der TMA konnte im Gegensatz zu RTS Frankfurt ein deutlicher Rückgang (bis zu 50%) in der Anzahl der gegebenen Vectoring-Instruktionen festgestellt werden. Allerdings wies der Luftraum hier keine kreuzenden Abflugrouten auf. Die geographische Lage der Lfz bei Erhalt der Anweisungen verlagerte sich bei der Anwendung von ASAS in größere Entfernungen zum Flughafen, was auf eine frühere Integration des Verkehrsstromes schließen lässt und die Lotsen und Piloten von kurzfristigen Vectoringanweisungen befreit.

Bordseitig bedeutete dies eine höhere Arbeitsbelastung der Piloten beim Eintritt in die TMA. Diese reduzierte sich jedoch in Fällen, in denen der Autopilot die Herstellung der vorgeschlagenen Geschwindigkeit regelte, und dies nicht mehr manuell von den Piloten kontrolliert werden musste. Pro Zeiteinheit wurden bei der Verwendung von ASAS mehr Lfz über dem Final Approach Fix (FAF) gezählt, als bei den Simulationen mit reinen Vectoringanweisungen, wodurch ein Anstieg im Durchsatz nachgewiesen werden konnte. Dies wurde hauptsächlich dadurch erreicht, dass durch die Verwendung von ASAS die Separation wesentlich genauer hergestellt werden konnte. Waren es bei konventionellem Vectoring nur 31% der Lfz, die das FAF mit einer Genauigkeit von ± 5 Sekunden überflogen, konnte dieser Wert bei der Verwendung der ASAS-Funktionen auf 75% gesteigert werden.

Insgesamt wurden durch die Verwendung von Merging Points direktere Trajektorien mit weniger Streuung geflogen. Die Summe der geflogenen Minuten reduzierte sich um 10% die geflogenen Distanzen um 5%, wobei die Piloten den lateralen Navigationsmodus länger nutzten. Die Lotsen merkten an, dass dieser Effizienzgewinn nur zu Lasten von handlungsflexibilität in der TMA erreicht werden kann. Die Lotsen bewerteten daher Szenarien mit einem langen Gegenanflug und einem 180° Turn als sehr positiv, da so die Flexibilität der Rückkehr zum konventionellen Verfahren jederzeit gegeben ist und einzelne Lfz aus der Kette herausgelöst werden könnten, falls erforderlich.

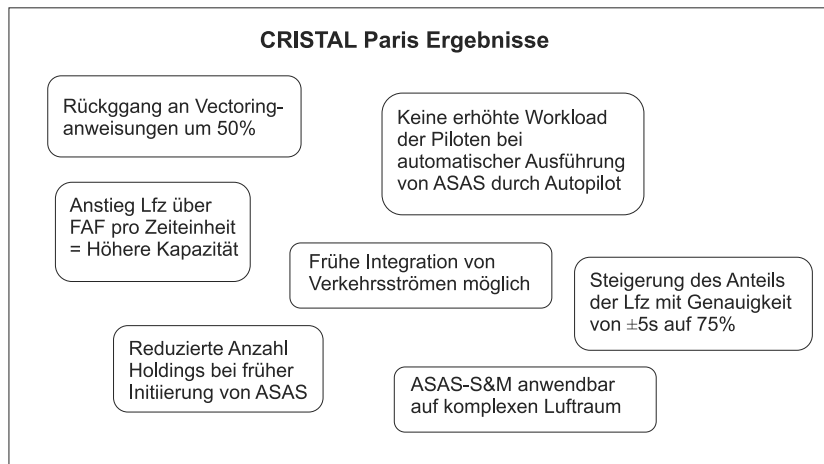


Abbildung 3.9: CRISTAL Paris Ergebnisse

Da zuvorige Ergebnisse zwar eine Reduzierung der Arbeitsbelastung des ausführenden Lotsen, jedoch eine Erhöhung der Arbeitsbelastung des Planungsloten lieferten, untersuchte CRISTAL Paris neben der Anwendung von ASAS in der TMA auch mögliche positive Effekte beim Übergang von ETMA zu TMA Sektoren durch die Verwendung eines Arrivalmanagers. Hier wurden sowohl der Einfluss fester und variabler AMAN-Spacingwerte gegenübergestellt als auch die Intensität der Vorab-Regulierung des herzustellenden Abstands variiert.

In Bezug auf die Methodik der Festlegung von Spacingwerten konnten keine Unterschiede festgestellt werden.

Die Verteilung von herzustellender Verzögerung (Time to Lose) zwischen ETMA und TMA, welche vom AMAN berechnet wurde, zeigt, dass von Tag zu Tag eine andere Aufteilungsstrategie die besten Ergebnisse lieferte. In den meisten Anwendungsfällen reduzierte sich Anzahl geflogener Holdings deutlich. Insgesamt konnte aus den Ergebnissen CRISTAL Paris Simulationen die Schlussfolgerung gezogen werden, dass ASAS S&M im komplexen Luftraum von Paris erfolgreich angewendet werden kann.

Auch die CoSpace Simulationen untersuchten die Realisierbarkeit der gleichzeitigen Anwendung von ASAS und Arrival Manager beim Übergang von der ETMA in die TMA (Grimaud et. al. [IG05], Hoffman et. al. [EH00] [EH02] [EH03]). Die vom AMAN vorbereiteten Sequenzen konnten häufig problemlos in ASAS-Sequenzen umgesetzt werden. In einigen Fällen konnte ASAS nicht angewendet werden, da die Randbedingungen zur Initiierung nicht erfüllt waren, d.h. zu große Geschwindigkeitsunterschiede bestanden oder der Abstand bereits geringer war als der von AMAN vorgeschlagene Wert. Dies wurde im späteren Verlauf gelöst, indem bei der Regelung nicht nur eine Randbedingung bezüglich der am Merging Point einzuhaltenden Zeit berücksichtigt wurde sondern darüber hinaus eine Geschwindigkeitsvorgabe einzuhalten war.

Beim Übergang von der ETMA in die TMA merkten die Lotsen an, dass die Tatsache, dass das Lead Aircraft der zweiten Kette keine neuen Vektoranweisungen erhalten kann, bis das letzte Trailing Aircraft der ersten Kette auch den Merging Point passiert hat, zu Einschränkungen führen kann, wenn in der TMA keine Routenstruktur verwendet wird und die Sektoren klein sind.

Die Übernahme bereits in der ETMA hergestellter ASAS-Sequenzen stellte kein Problem

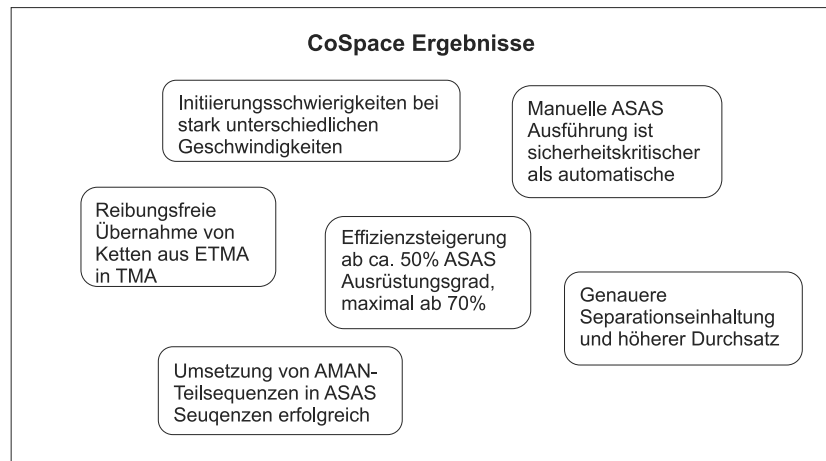


Abbildung 3.10: CoSpace Ergebnisse

dar. War jedoch vorgesehen, Lfz aus einem weiteren Verkehrsstrom zu integrieren, mussten auch hier die Ketten wieder aufgelöst werden. Der zusätzliche Koordinierungsaufwand konnte bewältigt werden, stellt aber eine zusätzliche Erhöhung der Arbeitsbelastung dar.

CoSpace bestätigte die operationelle Einsetzbarkeit der ASAS S&M Anwendungen in der TMA und untersuchte darüberhinaus den Einfluss des ASAS-Ausrüstungsgrades. Nicht mit ASAS bestückte Lfz wurden konventionelle Vectoring-Anweisungen gegeben, konnten aber als Lead Aircraft fungieren. Die Effizienzsteigerung in Bezug auf Zeitersparnis stieg ab einem Ausrüstungsgrad von 50% kontinuierlich an. Das Maximum konnte ab einem ASAS-Ausrüstungsgrad von 70% festgestellt werden. Darüberhinaus fand keine Steigerung mehr statt.

Insgesamt konnten eine genauere Separationseinhaltung und ein erhöhter Durchsatz nachgewiesen werden, welcher auch hier hauptsächlich auf die festgeschriebene Routenstruktur innerhalb der TMA zurückgeführt wurde.

Das Auftreten von Unterschreitung des Separationsabstandes wurde durch die Herausnahme des Lfz aus der Kette konfliktfrei gelöst. Die Schwierigkeit bestand für die Lotsen jedoch darin, sie wieder in die bereits hergestellte ASAS-Kette des anfliegenden Verkehrs zu integrieren.

Innerhalb der HAZOP Studie im Rahmen von CoSpace wurde erstmals eine kombinierte Sicherheitsbewertung der Anwendung von ASAS S&M mit der Beteiligung von Lotsen und Piloten durchgeführt. Sie identifizierte innerhalb der zweitägigen Simulationsreihe acht Ereignisse der zweithöchsten Kritikalitätsstufe. Diese betrafen die Tatsache, dass bei der Vergabe von ASAS-Anweisungen über Funk aber auch über CPDLC nur ein Teil der Anweisungen oder falsche Anweisungen (Spacingwert) übermittelt oder vom Piloten eingegeben wurden. Eine Automatisierung auf Seite der Piloten, die eine Kopplung der ASAS-Einheit an die Avionik umsetzt, wurde daher empfohlen. Auch die Selektierung eines falschen Targets könnte somit vermieden werden. Allerdings kam es sehr häufig vor, dass der Fehler bereits auf Seiten der Lotsen auftrat.

ASAS-Konzepte waren in der Vergangenheit nicht nur in Europa Gegenstand der Forschung. In den USA befasste sich die NASA in Langley ebenfalls mit der Untersuchung

von Sequencing und Merging-Applikationen in der TMA (Oseguera-Lohr et. al. [ROL02]). Dabei lag der Fokus auf der möglichen Verbesserung des Inter-Arrival Fehlers durch die Verwendung des ATAAS Tools (Advanced Terminal Area Approach Spacing) mit dem Ziel, den Durchsatz und damit die Performance an Flughäfen zu erhöhen. Auch hier wurden Anflugrouten verlängert und feste Routen bis zur Landeschwelle festgelegt. Realzeitsimulationen ergaben eine Abweichung im Bereich von von ± 5 Sekunden von der vorgesehenen Schwellenüberflugzeit im Falle manueller Geschwindigkeitskontrolle, sowie einen mittleren Fehler von -0,8 Sekunden bei einer Standardabweichung von ca. 4 Sekunden im Fall der Verwendung des Autopiloten.

In Flugversuchen am Chicago O'Hare Airport im Jahre 2003 (Lohr et.al. [GL05]) wurden die im Simulator gewonnenen Ergebnisse größtenteils bestätigt. Hier erreichte man einen mittleren Fehler von 0,8 Sekunden bei einer Standardabweichung von 7,7 Sekunden. Den Sequencing-Versuchen folgten Untersuchungen von Merging-Applikationen, denen eine Weiterentwicklung des ATAAS zu AMSTAR (Airborne Merging and Spacing for Terminal Arrivals) vorausging (Barmore et. al. [BB04] [BB05] [KK05]). Die Merging-Applikation basierte dabei jedoch nicht auf einer direkten Regelung des Abstandes zweier Lfz, sondern bediente sich der Zielzeit an der Schwelle als Bezugspunkt. Staffelungsunterschreitungen mussten hier durch eine separate Funktionalität gewährleistet werden. Die Merging-Applikation wurde in Simulationen auch unter verschiedenen Windbedingungen in wenig dichtem Verkehr erfolgreich getestet.

In den diesen Versuchen vorangegangenen Schnellzeitsimulationen wurden im Gegensatz zu den parallelen Projekten in Europa auch die Stabilitätseffekte in Bezug auf eine längere Kette von Lfz betrachtet. Diese zeigen bei einer Anzahl von 100 Lfz einen kontinuierlichen Anstieg des Spacingfehlers mit steigender Ordnungszahl in der Landesequenz. Separationsunterschreitungen wurden nicht untersucht.

Aufbauend auf den obigen Ergebnissen strengte auch das NASA Ames Research Center ab dem Jahr 2004 weiterführende Untersuchungen zur Effizienzsteigerung des Luftverkehrssystems an, die sich intensiver mit der Integration von 4D-Trajektorien und ASAS-Applikationen befassten [TP03]. Die Absicht bestand darin zu zeigen, dass die Verschmelzung der beiden Konzepte, die zuvor ausschließlich als konkurrierende Ansätze verstanden wurden, möglich ist und sich die Vorteile beider Methoden ergänzen können [TP05].

Im Unterschied zu den Versuchen innerhalb von CoSpace, die das Potenzial von ASAS auf Basis heutiger Verfahren untersuchte und der Forschung von NASA Langley, die sich auf Spacing Applikationen als alleiniges Mittel zur Steuerung von Anflugströmen beziehen, sieht das Konzept von NASA Ames eine Steuerung der einzelnen Lfz durch abgestimmte prädizierte 4D-Trajektorien vor. Die alleinige Verwendung von 4D-Trajektorien ohne ASAS trägt bereits zu einer Erhöhung der Sektorkapazität (bis zu 150%) in den ETMA Sektoren bei, da die Notwendigkeit für taktisches Vectoring größtenteils entfällt. Das Konzept von Prevot et al. sieht vor, der 4D-Trajektorie zu folgen, bis sich die Notwendigkeit für ein lokales Spacing ergibt (ASAS C&P) und empfiehlt dann zur 4D-Trajektorie zurückzukehren, solange der nächste Time Constraint noch gehalten werden kann. Ist dies nicht der Fall, erfolgt eine Anpassung und Neuverhandlung der Trajektorie. Innerhalb des Flughafennahbereiches ist die Verwendung von ASAS für den Fall von Prädiktionsungenauigkeiten an den Merging Points vorgesehen, die vom Lotsen erkannt und dann durch ASAS-Anweisungen abgefangen werden müssen. Durch die Orientierung der 4D-

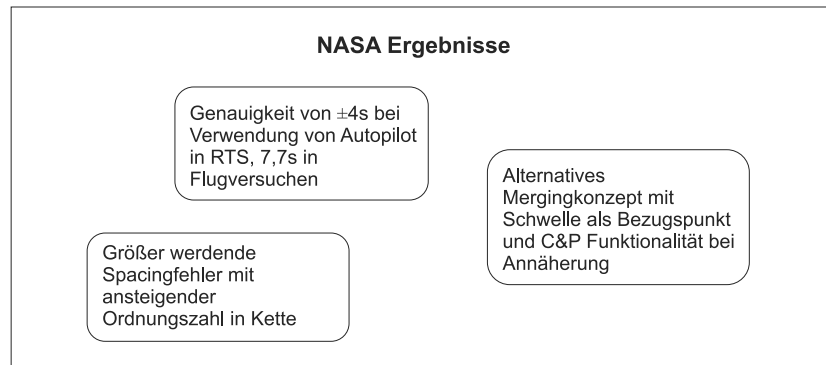


Abbildung 3.11: NASA Ergebnisse

Trajektorie an den Zielzeiten auf der Runway ergibt sich ein gleichmäßigerer Zufluss des Verkehrs in die TMA, der die Anzahl nicht umzusetzender ASAS-Paarungen und den Zeitverlust durch zu große Lücken verringert.

Um den Einfluss der 4D-Trajektorie auf die TMA zu verdeutlichen, führten Prevot et al. eine Simulation durch [TC05], in der koordinierte und unkoordinierte Arrivalströme in die TMA des Flughafens Dallas Ft. Worth untersucht wurden. Die Lotsen waren angehalten, ihre Unterstützungswerkzeuge derart zu nutzen, dass mittels der Spacinganweisungen die Ankunftszeiten auf der Schwelle möglichst genau mit dem Flugplan übereinstimmten.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte auch in diesem Fall am Inter-Arrival Fehler. Ohne das Vorhandensein adäquater Unterstützungswerkzeuge an Bord und auf dem Boden lässt sich trotz vergleichmäßiger Verkehrsströme durch die 4D-Trajektorien keine wesentliche Verbesserung im Spacingfehler feststellen. Verfügen jedoch Lotsen und Piloten über automatisierte Unterstützung, macht sich ein deutlicher Effekt bemerkbar. Die Verwendung von ASAS zeigt sich bereits im Fall unkoordinierter Arrivalströme als deutlich effizienzsteigernd. Während ohne Unterstützungswerkzeuge 80% des Verkehrs mit einem Fehler von ± 18 Sekunden landeten, reduzierte sich dieser Wert hier auf ± 10 Sekunden. Im Falle koordinierter Verkehrsströme steigerte sich der Anteil der Lfz im ± 10 Sekundenfenster sogar auf 90%.

3.4 Untersuchungsbedarf

Die hier vorgenommene Unterteilung der zu untersuchenden Aspekte im Zusammenhang mit der künftigen Einführung von ASAS-Anwendungen richtet sich nach der European Operational Concept Validation Methodology (E-OCVM) (ab 2005) [EUR10a] dem Nachfolger des MAEVA (MASTER ATM European Validation Plan) (seit 2001) Validierungsmethodik, die von Eurocontrol innerhalb des fünften EU Rahmenprogramms für Forschung und Technologieentwicklung wurde. Die ersten vier Punkte spiegeln dabei den performanceorientierten Ansatz des zukünftigen europäischen ATM Systems wider.

- **KAPAZITÄT:** Steigerung von Durchsatz und Kapazität
- **SICHERHEIT:** Verbesserung der Sicherheitskennzahlen

- **WIRTSCHAFTLICHKEIT:** Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch effizientere Trajektorien oder die Reduzierung von Verspätungskosten
- **UMWELT:** Nachweis, dass sich umweltbezogene Einflüsse im Rahmen international akzeptierter Normen bewegen
- **OPERABILITÄT:** Nachweis von Tauglichkeit und Nutzen in der Einsatzumgebung sowie Akzeptanz durch Lotsen und Piloten.

Zusätzlich zur operationellen Tauglichkeit ist die technische Tauglichkeit der untersuchten Anwendung ein Aspekt von großer Bedeutung. Der Nachweis über die technische Reife der eingesetzten Schlüsseltechnologie (Enabler) stellt die Grundvoraussetzung für die Einführung neuer Verfahren dar. In Bezug auf ADS-B zur Übertragung der Positionsinformationen wurde dieser Nachweis in der Vergangenheit ausreichend erbracht.

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Projekte untersuchten dedizierte ASAS-Applikationen jeweils hinsichtlich einem oder mehrerer der oben aufgeführten Punkte.

In Bezug auf die **Kapazität** konnte in Fällen hoher Arrivalnachfrage der direkte Nachweis erbracht werden, dass die Verwendung von ASAS auf festen FMS-Routen auch innerhalb der TMA eine Erhöhung des Durchsatzes bewirken kann. In Fällen eines gesteuerten Zuflusses in die TMA ließ sich eine Verringerung des Inter-Arrival Fehlers aufzeigen, aus der auf eine Kapazitätserhöhung durch reduzierte Sicherheitspuffer geschlossen werden kann. Die besten Ergebnisse wurden bei automatisierter Ausführung der ASAS-Anweisungen erzielt. Eine Erhöhung der Kapazität im Sinne höherer Verfügbarkeit von ausführenden Lotsen und Planungslotsen lässt sich mittels ASAS dann erreichen, wenn eine möglichst frühe Initiierung von ASAS-Ketten stattfindet. Die Einbettung in ein umfassendes ASAS Arrival-Konzept ist jedoch bis heute nicht erfolgt.

Bei der Validierung von ASAS-Anwendungen im Hinblick auf **Sicherheit** konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von ASAS in der Regel weniger Staffellungsunterschreitungen auftreten. Kritisch in Bezug auf die Sicherheit ist die Übertragung von ASAS-Anweisungen via Funk und die manuelle Eingabe der Staffellungswerte an Bord zu sehen. Da diese nachgewiesenermaßen fehleranfällig ist und es aufgrund dessen zu Staffellungsunterschreitungen kommen kann, ist an dieser Stelle der Einsatz eines Lotsenunterstützungswerkzeug oder sogar eine vollständige Automatisierung der Wertzuweisung und Übertragung anzuraten. Die Problematik könnte durch ein Konzept, in dem die Lfz ihr jeweils folgendes Target selbst identifizieren, komplett umgangen werden.

Die Bewertungen hinsichtlich Sicherheit im Zusammenhang mit Arbeitsbelastung sind nicht völlig schlüssig. Sind Lfz-Ketten einmal hergestellt, ist ein deutlicher Rückgang in der Arbeitsbelastung der Lotsen zu verzeichnen. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass gebildete Ketten nicht durch zusätzliche Anweisungen wieder aufgelöst werden müssen. Ein integriertes ASAS-Konzept für die TMA muss dieser Bedingung unbedingt genügen. Müssen Lfz aus der Kette gelöst und wieder eingefügt werden, stellt eine Anflugroutenstruktur mit Gegenanflügen variabler Länge die sicherste Alternative dar.

Die Einführung fester Arrivalrouten auch innerhalb der TMA erhöhte die **wirtschaftliche Effizienz** der geflogenen Trajektorien durch reduzierte Zeiten und Wegstrecken im Vergleich zum reinen Vectoring.



Abbildung 3.12: Zusammenführung der aus Defiziten abgeleiteten zu adressierenden Konzeptelemente

Eine unmittelbare Validierung von ASAS-Anwendungen in der TMA bezüglich des **Umwelteinflusses** fand bisher nicht statt. Es wurden aber indirekte Bewertungen mittels der Ableitung aus der Metriken der wirtschaftlichen Effizienz (Flugstrecke, Zeit) geliefert.

Da die **Operabilität** die Voraussetzung zur Einführung neuer Anwendungen und Konzepte darstellt, wurde deren Untersuchung in den beschriebenen Projekten besonders intensive Beachtung geschenkt.

Die Erkenntnis, dass „Heading then“ Anweisungen innerhalb von ETMA und TMA keine große Akzeptanz fanden, muss in Zukunft berücksichtigt werden und Manöver dieser Art in der TMA sollten deshalb nicht Teil des operativen Konzeptes sein.

Die Herstellung langer Ketten von Lfz wurde hinsichtlich des Nutzens durch die Lotsen wegen des deutlichen Einflusses auf die Arbeitsbelastung als sehr positiv bewertet. Allerdings war die Bildung langer Ketten schon bei Eintritt in die TMA in den untersuchten Konzepten mit den verwendeten Applikationen nicht mit dem gleichmäßigen Zusammenführen weiterer Verkehrsströme innerhalb der TMA vereinbar. Die Lotsen tendierten dazu eher kurze Ketten zu bilden und die kleinen Gruppen abwechselnd zusammenzuführen. Dieses Vorgehen verhindert eine optimale Sequenzbildung und widerspricht dem Ziel der effizienten Verkehrsabwicklung.

Aus diesem Grund und um eine hohe Kompatibilitätsrate der Initiierungsrandbedingungen zu erreichen, ist die Unterstützung durch einen Arrivalmanager unabdingbar, der durch die Vergabe von Zielzeiten (bzw. einer Time to Lose oder Time to Gain) eine ASAS-taugliche Gesamtsequenz vorbereitet.

Ein ASAS-Konzept welches erhebliche Geschwindigkeitsunterschiede der Lfz bei Initiierung der relativen Regelung erlaubt, wurde bisher nicht erstellt.

Die Aufrechterhaltung der Lfz Ketten erfolgte bisher jeweils im Track-Modus, was bedeutet, dass jedes der Lfz die Trajektorien seiner Targets lateral exakt nachfliegt und auch im Kurvenflug aufrecht erhält. Dabei werden zum einen auch Fehler bzw. evtl nicht genaue Einhaltung der Vectoring-Vorgabe des Lotsen an das Lead Aircraft „kopiert“ und zum anderen die Flexibilität im Kurvenflug eingeschränkt. Ein künftiges Konzept sollte daher auf einer relativen Navigation fußen, die sich auf die jeweils optimale „Ownship“-Trajektorie, also die im FMS hinterlegte RNAV Route des jeweiligen Trailing Aircraft bezieht.

Ziel der vorliegenden Arbeit soll nun sein, die identifizierten Defizite der ASAS-Applikationen und der damit verbundenen operationellen Teilkonzepte zu adressieren und die Handlungsempfehlungen sowie die oben aufgeführten Modifikationen (s. Abb. 3.12) zu einem neuen integrierten durchgängigen operationellen Konzept für den Flughafennahbereich zu vereinen, sodass ein positiver Beitrag zu den aufgeführten Bewertungskriterien geleistet wird. Dieses Konzept umfasst den Aufbau einer einzigen Kette von Lfz vom Anflug auf das Metering Fix bis zur Landung. Dabei muss sichergestellt werden, dass durch die relative Navigation keine unerwünschte destabilisierenden Effekte auftreten. Damit soll sich das folgende Kapitel befassen.

Kapitel 4

Analyse anwendbarer Regelungsverfahren

4.1 Vorangegangene Untersuchungen

Bei den operationellen Untersuchungen von ASAS-Anwendungen in Europa bediente man sich eines distanzbasierten Reglers, der den räumlichen Abstand zwischen Target Aircraft und Trailing Aircraft kontrollierte.

Besonders bei der Verwendung von ASAS im Flughafennahbereich wurde für die Lotsen schnell deutlich, dass sich der Einsatz eines abstands-basierten Reglers bei sukzessiver Geschwindigkeitsverringerng des Target Aircraft, wie es bei der Annäherung an den Zielflughafen der Fall ist, als nicht sinnvoll darstellt. Ein gleichbleibender Abstand bei geringer werdender Geschwindigkeit des Target Aircraft führt in einer Kette von Lfz dazu, dass schon bereits in großer Entfernung zum Zielflughafen geringe Geschwindigkeiten auftreten, da das letzte Lfz in der Kette auf die Geschwindigkeitsänderung des Target Aircraft reagiert.

Zudem ist die erforderliche Separation der Lfz in größerer Entfernung zum Zielflughafen größer als in unmittelbarer Nähe des Flughafens, wo zusätzliche Ortungshilfen zur Verfügung stehen, sodass im Verlauf des Anfluges eine Anpassung des Sollwertes stattfinden müsste.

Die Eigenschaft der Verringerung des räumlichen Abstandes mit Abnahme der Geschwindigkeit wohnt einem zeitbasierten Regler dagegen direkt inne (s. Abb. 4.1). Das Verhalten einer Kette von Lfz bei einer Geschwindigkeitsreduktion ist jedoch von der Art der Bestimmung der Regelgröße abhängig (s. Abschnitt 4.3).

Der Fokus der folgenden Betrachtungen liegt aufgrund der durch das für die vorliegenden Arbeit relevante operationelle Einsatzgebiet gegebenen Randbedingungen deshalb hauptsächlich auf der zeitbasierten Regelung.

Erste theoretische Überlegungen durch Soerensen und Goka [JS83] zur zeitbasierten Abstandsregelung von intrail fliegenden Lfz lieferten zwei verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Regelgröße.

Das Constant Time Predict Verfahren (CTP) definiert den zeitlichen Abstand zum vorausfliegenden Lfz, basierend auf der geographischen Entfernung dividiert durch die mo-

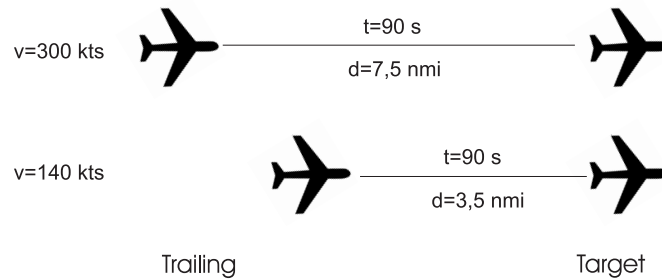


Abbildung 4.1: Verringerung der Distanz bei gleichbleibender zeitlicher Separation

mentane Geschwindigkeit des Trailing Aircraft und beantwortet die Frage „Wann wird das Trailing Aircraft an der Stelle sein, an der sich das Target Aircraft zum aktuellen Zeitpunkt befindet. Das Constant Time Delay Verfahren (CTD) dagegen wird charakterisiert durch eine zeitliche Verschiebung und die Formulierung der Frage „Wann war das Target Aircraft an der Stelle, an der sich das Trailing Aircraft zum aktuellen Zeitpunkt befindet.

Beim CTP-Verfahren kommt es bei einer längeren Kette von Lfz zwar zu einem Verzögerungseffekt (siehe Abschnitt 4.3.3), destabilisierende Effekte wurden von Soerensen und Goka in einer Kette von 8 Lfz bei einer Untersuchung im Flugsimulator jedoch nicht festgestellt.

Bei der Implementierung der eigentlichen Regelung wurden verschiedene Varianten entwickelt. So griff man bei der Berechnung der Geschwindigkeitsvorgabe beispielsweise auf eine Addition von Fehlerterm und Basis Target Speed (Geschwindigkeit über Grund des Target zu dem Zeitpunkt, als es sich an der Stelle des Trailing Aircraft befand), zurück. Aber auch andere Konzepte fanden in der TMA Anwendung, wie das der Verwendung eines nominalen Geschwindigkeitsprofils vom Eintritt in die TMA bis zum Beginn des stabilisierten Endanfluges anstelle der Basis Target Speed (Lohr et. al., [ROL02]).

Hoffman [EH00] untersuchte das Verhalten einer Kette von 9 Lfz in einer auf BADA-Daten (Base of Aircraft Data, Aircraft Performance Modell von Eurocontrol, [EUR10b]) basierenden Simulation, die zusätzlich ein Modell des Pilotenverhaltens beinhaltete. Hier wurde die Performance von Constant Distance, einem vereinfachten CTD sowie einem CTP-Verfahren im Sinkflug bei ortsfestem Top of Descent betrachtet, wobei in einem Szenario die Geschwindigkeit des Target Aircraft konstant gehalten wurde und in einem zweiten Szenario eine Geschwindigkeitsreduktion von 20 Knoten stattfand. Eine ADS-B Updaterate von einer Sekunde wurde berücksichtigt. Das Regelgesetz fußte hier auf einem PD Regler mit Geschwindigkeit des Trailing Aircraft als Basisgeschwindigkeit. Die Simulationen ergaben im Falle gleichbleibender Geschwindigkeit einen Separationsfehler von 1% beim CTD für alle Lfz in der Kette und keine Separationsfehler für die anderen Verfahren. Als Maß für die Stabilität zeigten die Geschwindigkeitsvariationen der folgenden Lfz beim CTP einen Anstieg um bis zu 14kts, wogegen diese beim CTD nur im Bereich von bis zu 3kts lagen. Bei einer Geschwindigkeitsreduktion während des Sinkfluges stieg der Separationsfehler auf bis zu 30% beim neunten Lfz an. Die Geschwindigkeitsvariationen dagegen wiesen beim CTP nur 13kts, beim CTD dagegen jedoch bis zu 90kts auf. Allerdings wurde bei der Bestimmung der Regelgröße im CTD davon ausgegangen, dass nur geringe Geschwindigkeitsgradienten auftraten. Diese Vereinfachung stellte sich

als nicht gerechtfertigt dar. Die Ursachen und Randbedingungen für das festgestellte Verhalten wurden jedoch nicht diskutiert und weitere theoretische Überlegungen blieben aus. Ebenso wenig erfolgte eine Analyse der Eignung für operationellen Einsatzfälle.

Ein Folgeuntersuchung [EH03] führte dann das exakte CTD Kriterium ein, wie es in Abschnitt 4.3.1 beschrieben ist. Dessen Performance zeigt gegenüber dem vereinfachten Kriterium eine wesentliche Reduzierung des kommandierten Geschwindigkeitsbereiches (-80%) und des resultierenden Separationsfehlers (-60%). Die Betrachtung einer längeren Kette von Lfz wurde jedoch nicht wiederholt.

Im Rahmen der gleichen Simulation analysierte Hoffman das Verhalten eines CTD Reglers in einem Sinkflugszenario mit Geschwindigkeitsreduktion unter unterschiedlichen Windbedingungen. Der Regler war in der Lage auch bei turbulenten Windbedingungen mit einem Mittelwert von 84kts in Bodennähe und laut Windmodell entsprechenden 126kts in 30000ft Höhe eine Separationsgenauigkeit von 10 Sekunden aufrechtzuerhalten (Gegen- und Rückenwind). Erwartungsgemäß wurde der größte Fehler im Falle einer „Light“-„Heavy“ Kombination von Lfz festgestellt, wobei die Trägheitseffekte des größeren Lfz zum Tragen kommen. Die Untersuchung lieferte jedoch keinen erneuten direkten Vergleich mit der Performance eines CTP-Kriteriums.

Obige Untersuchungen betrachten die Situation, dass sich die betreffenden Lfz bei der Initiierung der ASAS-Applikation bereits auf dem selben lateralen Flugpfad befinden (ASAS Romain Behind Manöver). In diesem Fall existiert kein ortsfester Bezugspunkt, an dem eine Herstellung des Sollwertes erfolgt sein muss. Eine andere Anwendung besteht darin, das ASAS-Manöver an einen festgelegten Merging Fix zu binden, an dem zwei oder mehr Anflugrouten zusammengeführt werden (Merge Behind Manöver). Hoffman [EH02] formulierte ein distanzbasiertes Regelkriterium, das die Geschwindigkeiten von Target und Trailing Aircraft berücksichtigt. Dazu wird zunächst die Zeit berechnet, die das Target Aircraft aufgrund seiner momentanen Geschwindigkeit benötigt, um den Merging Point entlang dessen Route zu erreichen. Daraufhin wird die Distanz berechnet, die das Trailing Aircraft in dieser Zeitspanne entlang seiner eigenen Route zurücklegt. Die Regeldifferenz berechnet sich dann aus der so ermittelten prädierten Distanz des Trailing Aircraft zum Merging Point und der vorgeschriebenen Solldistanz.

Das Ergebnis der Regelung mit einem linearen Regler ergab zwar selbst bei großer initialer Entfernung des Target Aircraft zum Merging Point einen sehr geringen Fehler in Bezug auf den gewünschten Abstand, jedoch wichen die Geschwindigkeiten von Target und Trailing Aircraft beim Passieren des Merging Points je nach initialer Geschwindigkeitsdifferenz um bis zu 30kts voneinander ab.

Hoffman entwarf daraufhin einen nichtlinearen Regler, dessen Aufgabe darin bestand, zusätzlich zum Herstellen des korrekten Abstandes bei Erreichen des Merging Points auch die Bedingung einer vorgegebenen Geschwindigkeit erfüllt haben zu müssen.

Dies wurde erreicht, indem unter Kenntnis der maximalen Beschleunigung und Verzögerung des Trailing Aircraft die Dauer für das Kommandieren einer maximalen oder minimalen Geschwindigkeit, je nach Vorzeichen des Fehlers, berechnet wurde, mit der Maßgabe, dass direkt im Anschluss die am Merging Point geforderte Geschwindigkeit eingestellt werden muss.

Mit dieser Methode konnte der Geschwindigkeitsfehler auf nahe Null reduziert werden. Der resultierende Separationsfehler bei Erreichen des Merging Points lag bei ca. 0,1nmi.

Ein Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass die Initiierungsbedingungen für ein anschließendes Remain Behind Manöver entlang derselben Route harmonisiert werden können und somit keine destabilisierenden Effekte zu erwarten sind.

Hoffman nahm jedoch keine Übertragung des Verfahrens in eine zeitbasierte Regelungsmethode vor.

4.2 Untersuchungsbedarf

Bei der Herleitung eines geeigneten Regelungskonzeptes für die auf einer relativen Regelung basierende Anflugführung in der TMA muss den unterschiedlichen Phasen des Anflugs Rechnung getragen werden (s. Kap. 5). In Kapitel 6 soll untersucht werden, wie die Regelung in jeder dieser Phasen aufgrund der herrschenden Randbedingungen gestaltet werden kann. Dabei spielen auch die Übergänge zwischen den einzelnen Phasen eine große Rolle.

Zunächst muss analysiert werden, ob in Bezug auf die für diesen Zweck einsetzbaren Regelungsverfahren noch grundlegender Untersuchungsbedarf besteht.

Bei der Anwendung von ASAS mit zeitbasierter Regelung wurden in der Vergangenheit Instabilitätseffekte hauptsächlich für einzelne Lfz-Paare und Ketten bis zu einer Länge von bis zu 10 Lfz untersucht. Geht man davon aus, dass in Zukunft auch wesentlich längere Ketten in einem Anflugstrom hergestellt werden sollen, wie es in der vorliegenden Arbeit beabsichtigt ist, haben bisherige Betrachtungen diesbezüglich nicht intensiv genug stattgefunden. Dies gilt vor allen im Hinblick auf den Einfluss der Methode zur Bestimmung der Regelgröße und der ihr innewohnenden Effekte im Fall eines für Anflug und Landung typischen Geschwindigkeitsverlaufes.

In diesem Zusammenhang spielt auch die Updaterate von Statusinformationen über das jeweilige Target Aircraft eine wichtige Rolle. Verzögerungen in der Informationsweitergabe und -verarbeitung wurden bisher nur durch ein Pilotenreaktionsmodell abgebildet, das im Falle einer Automatisierung und Übernahme der Aufgaben durch den Autopiloten jedoch nicht von Bedeutung ist.

Auf die in der Vergangenheit wenig beleuchteten Aspekte des Verhaltens in einer langen Kette von Lfz wird deshalb in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

4.3 Regelungsverfahren

4.3.1 Constant Time Delay (CTD)

Das Regelgesetz des Constant Time Delay zur Herstellung des zeitlichen Sollabstandes lautet

$$v_{cmdCTD} = v_{tgt}|_{r_{trail}} + k_p \cdot e_{dCTD} + k_d \cdot \frac{de_{dCTD}}{dt} \quad (4.1)$$

Es nutzt die Geschwindigkeit, die das Target Aircraft an dem Ort hatte, an dem sich das Trailing Aircraft aktuell befindet zur Vorsteuerung. Die Regeldifferenz bestimmt sich aus

der Differenz der aktuellen Zeit zu dem Zeitpunkt, zu dem das Target Aircraft die momentane Position des Trailing Aircraft passiert hat und dem vorgegebenen Sollabstand. Dies bedeutet, dass das Trailing die ausgesendeten ADS-B Informationen des Targets mindestens für den Zeitraum des zeitlichen Sollabstandes plus dem Zeitraum des bei der Initiierung maximal zulässigen Fehlers speichern muss. Der zeitliche Fehler ist

$$e_{tCTD} = t - t_{tgt}|_{r_{trail}} - \Delta t_{soll} \quad (4.2)$$

und distanzbasiert ausgedrückt ergibt sich

$$e_{dCTD} = r_{soll} - r_{trail} = r_{tgt}(t - \Delta t_{soll}) - r_{trail}(t) \quad (4.3)$$

beziehungsweise

$$e_{dCTD} = r_{tgt}(k - \Delta t_{soll}/T) - r_{trail}(k) \quad (4.4)$$

mit dem Zeitschritt k und der Datenübertragungsperiode T , wenn die Informationen über das Target nur diskret verarbeitet werden.

Um die Entstehung eines Fehlers zu vermeiden, muss das Trailing Aircraft demnach den ortsbezogenen Geschwindigkeitsverlauf des Target Aircraft exakt kopieren.

Der nach dem CTD-Verfahren bestimmte Fehler beschreibt den Fehler in Bezug auf einen bestimmten Punkt, wie beispielsweise einen Merging Point oder die Landeschwelle. Es muss ein bestimmter Zeitraum verstreichen, bevor ein weiteres Lfz diesen Punkt passieren darf. Dabei bleibt unberücksichtigt, wie weit die zwei Lfz zum aktuellen Zeitpunkt tatsächlich voneinander entfernt sind. Letzteres ist in Bezug auf Sicherheitsaspekte jedoch eine relevante Größe. Diese wird in dem in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen CTP-Verfahren implizit berücksichtigt.

Die Regelung mittels PD-Regler ist stabil. Blockschaltbild sowie Stabilitätsanalyse eines Luftfahrzeugpaares im angewendeten Regelungsverfahren finden sich im Anhang B.1.

Die Art und Weise der Bestimmung der Regeldifferenz kann Einfluss auf die Regelungseigenschaften des CTD-Verfahrens in einer langen Kette von Lfz haben.

Da die Position des Trailing Aircraft nur in den seltensten Fällen exakt mit einer Position übereinstimmt, an der das Target eine ADS-B Information ausgesendet hat, muss der Zeitpunkt, zu dem sich das Target an der Position des Trailing Aircraft befand, aus den umgebenden Datenpunkten abgeleitet werden.

Ähnliches gilt für die Bestimmung der Geschwindigkeit, die das Target an der momentanen Position des Trailing Aircraft aufwies. Im ADS-B Protokoll ist zwar ein Feld für die direkte Übertragung der zur jeweiligen Position gehörigen Geschwindigkeiten vorgesehen, jedoch wird dieser Wert nicht von allen Lfz übermittelt. Außerdem ist die Qualität dieser doppelt fremdbestimmten Information nicht gewährleistet. Eine Ableitung der Geschwindigkeit aus den Positionsinformationen wird daher vorgezogen.

An dieser Stelle sollen zwei unterschiedliche Methoden betrachtet werden.

Bei der ersten Methode wird zur Bestimmung des Zeitpunktes, an dem sich das Target Aircraft an der jetzt aktuellen Position des Trailing befand, der zuletzt überflogenen Datenpunkt genutzt.

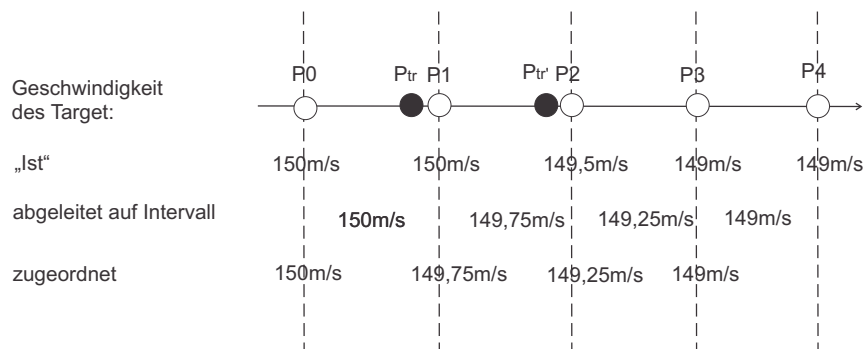


Abbildung 4.2: Aus ADS-B Daten abgeleitete Geschwindigkeiten bei Zuordnung zu Datenpunkt

Die Punkte P0 bis P4 in Abb. 4.2 bezeichnen frühere Positionen des Target Aircraft mit zugehörigen ADS-B Informationen im Abstand von 1 Sekunde. Zur Bestimmung der zum Datenpunkt gehörenden Geschwindigkeit des Target wird diese aus den Positionsinformationen und dem dazwischen verstrichenen Zeitintervall abgeleitet und dem letzten überflogenen Datenpunkt zugeordnet (s. Abb. 4.2). Im Beispiel hat das Trailing (P_{tr}) bereits fast den Punkt P1 erreicht. Die zugehörige Zeitinformation würde hier aus dem Punkt P0 extrahiert, da dieser den zuletzt überflogenen Punkt darstellt.

Angenommen das Trailing befindet sich zu diesem Zeitpunkt an einer Position, die der gewünschten Regelgröße entspricht (kein Fehler), würde trotzdem ein Fehler von 1 Sekunde detektiert werden (Trailing Aircraft ist zu spät).

Die nach dem Regelgesetz kommandierte neue Geschwindigkeit des Trailing Aircraft an dieser Stelle setzt sich aus der dem Intervall zugeordneten Geschwindigkeit des Target Aircraft an dieser Stelle (150m/s) und dem Fehlerterm (vermeintlich positiver Fehler, „zu spät“) zusammen. Somit ist die kommandierte Geschwindigkeit jedoch größer als die tatsächliche Geschwindigkeit des Target Aircraft an dieser Stelle, wodurch real ein kleiner negativer Fehler induziert wird.

Befindet sich das Trailing Aircraft zum Berechnungszeitpunkt dagegen an der Position $P_{tr'}$, wird ebenfalls eine Regeldifferenz von ca 1 Sekunde detektiert. Da das Target Aircraft an dieser Stelle seine Geschwindigkeit bereits verringert hat, ergibt sich eine abgeleitete Geschwindigkeit von 149,75m/s anstatt der tatsächlichen Geschwindigkeit von 149,5m/s. Daraus resultiert auch an dieser Stelle eine kommandierte Geschwindigkeit die höher ist, als sie das Target an dieser Stelle aufwies, wodurch in Realität ein negativer Fehler (Trailing Aircraft zu nah bzw. zu früh) generiert wird. Der Effekt wäre in diesem Fall durch die Fehlbestimmung der Geschwindigkeit noch ausgeprägter, als im zuvor beschriebenen Fall.

Erst mit den folgenden Schritten, ergibt sich aus dem Regelgesetz die Vorgabe einer niedrigeren Geschwindigkeit. Die Anpassung an das Geschwindigkeitsprofil des Target Aircraft erfolgt also verzögert.

Hält das Trailing Aircraft seine Ausgangsgeschwindigkeit für eine Sekunde länger aufrecht, beginnt die Verzögerungsphase des Trailing bei einer Referenzgeschwindigkeit des Target Aircraft von 300kts Geschwindigkeit erst 0,08nmi weiter stromabwärts als die des Target Aircraft.

Da sich dieser Effekt mit jedem folgenden Trailing Aircraft wiederholen kann, bedeutet

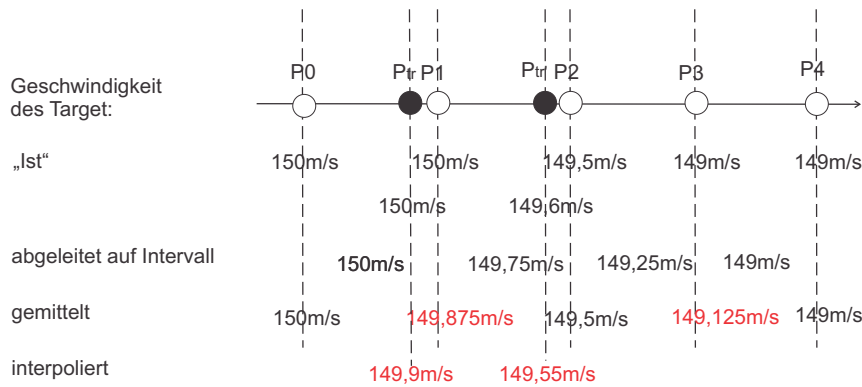


Abbildung 4.3: Aus ADS-B Daten abgeleitete Geschwindigkeiten bei zweifacher Mittlung

dies für eine Kette von ca 100 Lfz, dass sich der Punkt an dem die Verringerung der Geschwindigkeit eingeleitet wird bereits um 8nmi stromabwärts bewegt. Diesen Effekt, der trotz der relativ hohen ADS-B Updaterate von 1s auftritt, gilt es bestmöglich zu vermeiden.

Daher soll hier eine zweite Methode zu Fehlerbestimmung und Ableitung der Targetgeschwindigkeit untersucht werden.

Der zu $P_{tr'}$ gehörige Zeitpunkt kann auch über ein lineare Interpolation zu den nahegelegenen Datenpunkten P1 und P2 gehörigen Zeitstempel im Verhältnis der Abstände von $P_{tr'}$ zu P1 und P2 berechnet werden. Der Fehler, der dabei gegenüber einer Interpolation auf Basis des tatsächlichen Verzögerungsverlaufes in diesem Intervall gemacht wird, beträgt ca 0,1s.

Obiges gilt jedoch nur unter der Annahme, dass sich in der Verzögerungsphase die negative Beschleunigung nur langsam ändert. Wie eine Analyse auf Basis von BADA-Daten zeigt (s. Tabelle 4.1), ändert sich im Laufe des Anflugs über einen Geschwindigkeitsbereich von 140kts die Verzögerung nur um einen Betrag zwischen 0,3 und 0,5m/s.

In jedem Fall spielt die möglichst genaue Ermittlung der Geschwindigkeit des Target Aircraft an den zu den ADS-B Datensätzen gehörenden Positionen eine wichtige Rolle bei der Vermeidung einer Propagation des Geschwindigkeitsprofils.

Dies wird durch ein erneutes Mitteln der für das jeweilige Intervall abgeleiteten Geschwindigkeiten erreicht (s. Abb 4.3). Im Gegensatz zum vorigen Verfahren wird lediglich im Schritt der Einleitung und Ausleitung der Geschwindigkeitsänderung ein geringer Fehler bei der Bestimmung des zum Datenpunkt gehörigen Geschwindigkeit gemacht.

Der Effekt einer Propagation des Geschwindigkeitsprofils wird bei der Anwendung einer Interpolation stark reduziert. Außerdem wird durch die Art der Ableitung der Geschwindigkeitsinformationen die Richtung der Propagation umgekehrt (s. Abb. 4.3). Unter Sicherheitsgesichtspunkten ist dieser Verlauf weniger kritisch. Beginnt die Regelung nach dem CTD-Verfahren zudem an einem bestimmten Ort, kann keine Propagation der Geschwindigkeit über diese Position hinaus stattfinden.

Bei der Implementierung eines CTD-Verfahrens sollte deshalb unbedingt die zweite Methode angewendet werden.

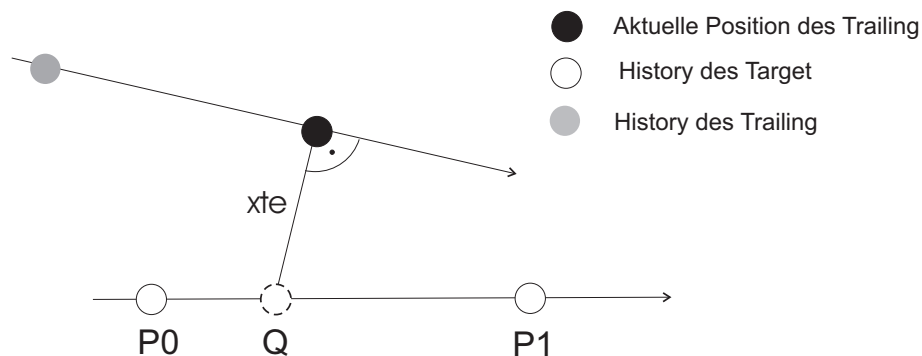


Abbildung 4.4: Interpolation bei abweichenden Tracks

Da die Tracks (lateral geflogene Trajektorien über Grund) der aufeinanderfolgenden Lfz nicht exakt übereinstimmen, können durch die geometrischen Betrachtungen Fehler in der Bestimmung der Regelabweichung entstehen, die aber keinen Propagationseffekt hervorrufen. Bei geringfügig abweichenden Tracks von Target und Trailing Aircraft und/oder bei vorhandenem Cross Track Error (xte), erfolgt die Bestimmung des gesuchten Punktes Q, wie in Abbildung 4.4 dargestellt.

Obwohl die ADS-B Informationen mit der Frequenz von 1Hz ausgesendet werden, ist nicht gewährleistet, dass die für einen Iterationsschritt erforderlichen Berechnungen ebenfalls innerhalb einer Sekunde abgeschlossen sind. Es soll daher im folgenden untersucht werden, wie sich unterschiedliche Verarbeitungsgeschwindigkeiten der Bordsysteme auf das Verhalten einer nach CTD geregelten Kette von Lfz auswirken.

Selbst bei unendlich schneller Verarbeitung der Informationen würde sich ein Fehler ergeben, wenn das Trailing Aircraft aufgrund seiner aerodynamischen Eigenschaften nicht in der Lage ist, der kommandierten Geschwindigkeit, die sich aus der detektierten Verzögerung des Target Aircraft ergibt, zu folgen. In den frühen Anflugphasen sollen keine widerstandsvergrößernden Maßnahmen ergriffen werden (Clean Configuration). Die Untersuchung wird deshalb für den Fall durchgeführt, dass als erstes sog. Leading Aircraft das Lfz mit dem geringsten Verzögerungsvermögen eingesetzt wird, so dass jede Art von Trailing Aircraft theoretisch in der Lage wäre, dem Geschwindigkeitsprofil des Leading Aircraft zu folgen.

Zu diesem Zweck wurden die typischen Werte der Verzögerung gängiger Lfz-Muster bei Initialgeschwindigkeiten von 300kts und 160kts GS und den zugehörigen typischen Höhen und Klappenstellungen mit Hilfe von BADA-Modelldaten ausgewertet (s. Tabelle 4.1).

Abbildungen 4.5 und 4.6 zeigen die Geschwindigkeitsverläufe einer Kette von 100 Airbus A340 für Verarbeitungsintervalle Δt_{calc} von 1 und 10 Sekunden ausgehend von einer Geschwindigkeit von 300kts bei Verzögerung des Leading Aircraft auf 265kts.

Es soll an dieser Stelle davon ausgegangen werden, dass alle Lfz den korrekten Sollabstand hergestellt haben.

Bei der Detektion des Fehlers tritt im ungünstigsten Fall ein zeitlicher Verzug in der Informationsverarbeitung in Höhe der Dauer des Berechnungsschrittes auf. Dies geschieht, wenn das Trailing Aircraft gerade kurz vor Beginn der Verzögerungsphase des Target Aircraft seine nächste Berechnung initiiert hat und den dadurch entstandenen Fehler erst zu Beginn des nächsten Berechnungsschrittes bemerkt.

	A340-300		A320		B747-400		B737-800	
	300kts	160kts	300kts	160kts	300kts	160kts	300kts	160kts
m_{min+a}	-0,57	-0,87	-0,8	-0,84	-0,68	-0,88	-0,84	-0,8
m_{half}	-0,54	-0,88	-0,72	-0,85	-0,65	-0,9	-0,69	-0,95
m_{ref}	-0,52	-0,91	-0,7	-0,94	-0,63	-1,05	-0,66	-1,02

		A340-400	A320	B747-400	B737-800
m_{min+a}	Leergewicht+Alternate Fuel	145	44	195	54
m_{half}	m_{min+a} +halbe max. Zuladung	165	53	185	65
m_{ref}	m_{min+a} +max. Zuladung	210	64	230	65

Tabelle 4.1: Verzögerungen [m/s^2] verschiedener Lfz-Muster bei Initialgeschwindigkeiten von 300kts und 160kts und unterschiedlichen Massen [t]

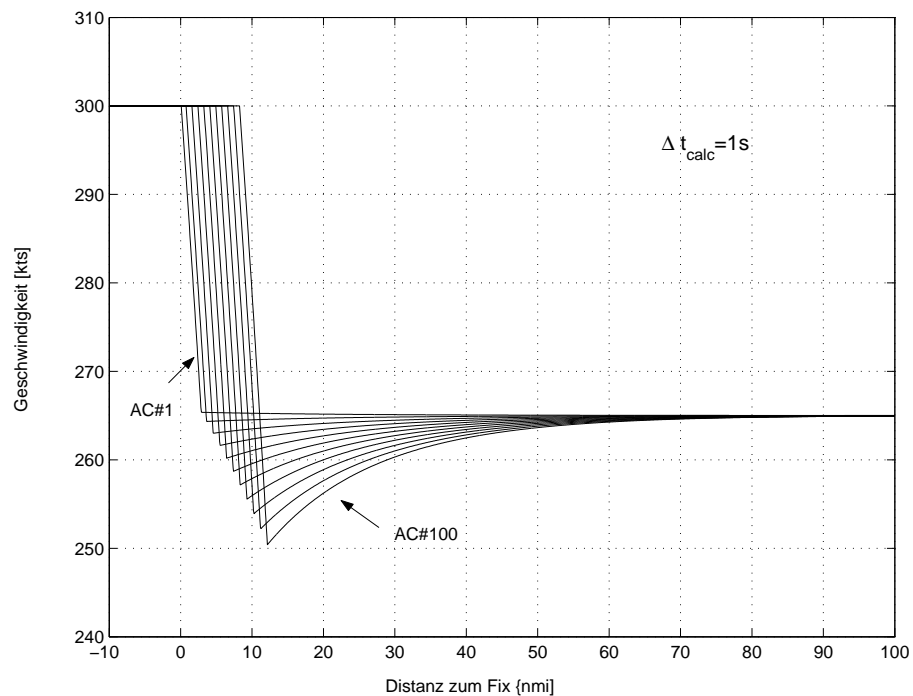


Abbildung 4.5: Geschwindigkeiten im CTD-Verfahren bei einer Kette von 100 Lfz und $\Delta t_{calc} = 1s$

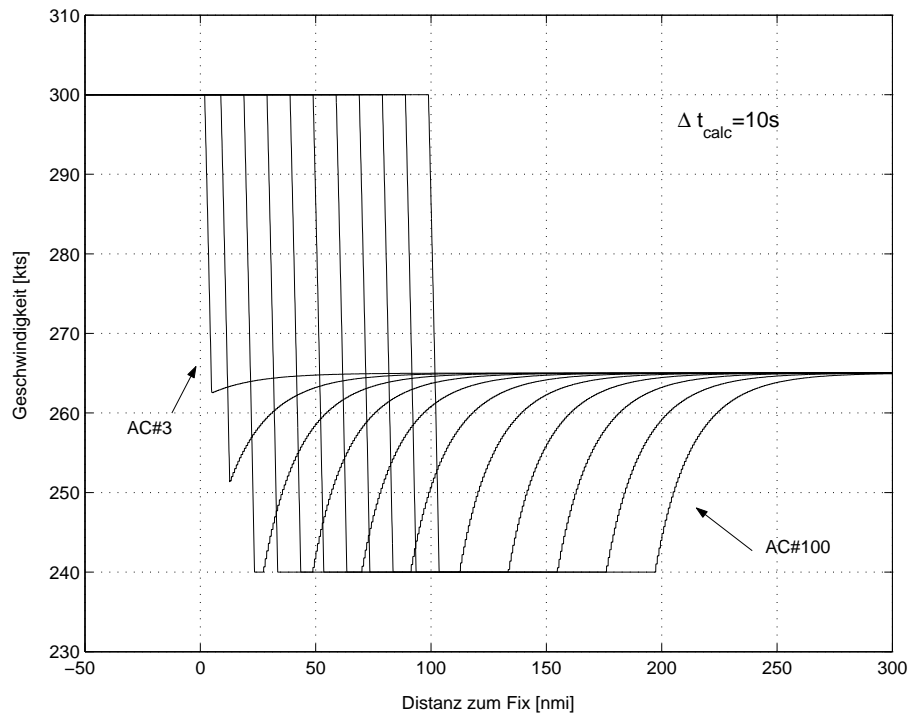


Abbildung 4.6: Geschwindigkeiten im CTD-Verfahren bei einer Kette von 100 Lfz und $\Delta t_{calc} = 10s$ (Begrenzung auf 240kts)

Obwohl wie oben beschrieben durch die Implementierung des Regelgesetzes eine Propagation der Geschwindigkeitsverlaufes stromabwärts beim Interpolationsverfahren nicht mehr auftritt, kann diese jedoch durch die Berechnungsdauer der neuen Geschwindigkeitsvorgabe hervorgerufen werden.

Wie in Abbildung 4.5 zu sehen, bewegt sich der Einleitungspunkt der Geschwindigkeitsrücknahme bei einer Kette von 100 Lfz bei Δt_{calc} von einer Sekunde um ca. 8nmi stromabwärts. Dagegen sind es bei Δt_{calc} von 10 Sekunden bereits ca. 100nmi.

In der Berechnung wurde jedoch vom ungünstigsten Fall ausgegangen, in dem bei jedem Trailing Aircraft die Verzögerung unmittelbar nach Beginn eines neuen Berechnungsschrittes erfolgt. In der Realität wäre hier von einer Gleichverteilung auszugehen, sodass sich die Propagationsstrecke in etwa halbiert.

Da das Target Aircraft nach Detektion des Fehlers der kommandierten Geschwindigkeit nicht im erforderlichen Maße folgen kann (alle Lfz haben gleiches Verzögerungsvermögen), baut sich der Fehler wie in den Abbildungen 4.7 und 4.8 zu sehen zunächst weiter auf (negativer Fehler = zu dichtes Auffliegen), bis das Target Aircraft nicht weiter verzögert.

Bei größeren Δt_{calc} wird der in einem Berechnungsschritt kommandierte Wert, sobald dieser erreicht ist, beibehalten, obwohl eigentlich erneut eine niedrigere Geschwindigkeit kommandiert werden müsste. Bei größeren Δt_{calc} hat dies zur Folge, dass der Geschwindigkeitsverlauf des Trailing Aircraft flacher wird und sich der Fehler umso stärker aufbaut.

Das Resultat in beiden Fällen ist, dass das Trailing Aircraft um den entstandenen Fehler zu kompensieren, über einen bestimmten Zeitraum eine geringere Geschwindigkeit her-

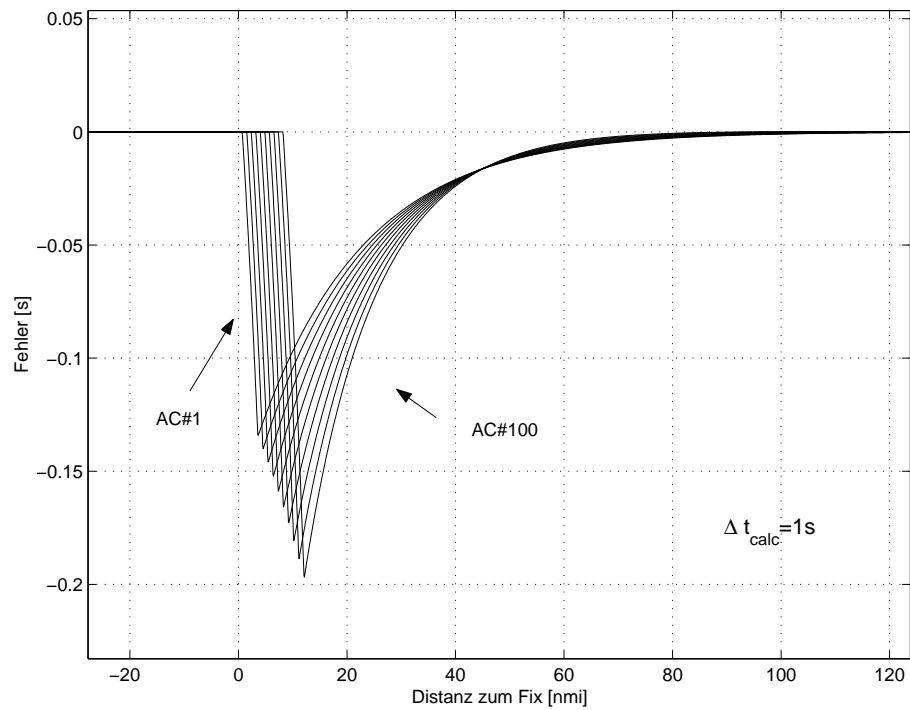


Abbildung 4.7: Fehler im CTD-Verfahren bei einer Kette von 100 Lfz $\delta t_{calc} = 1s$

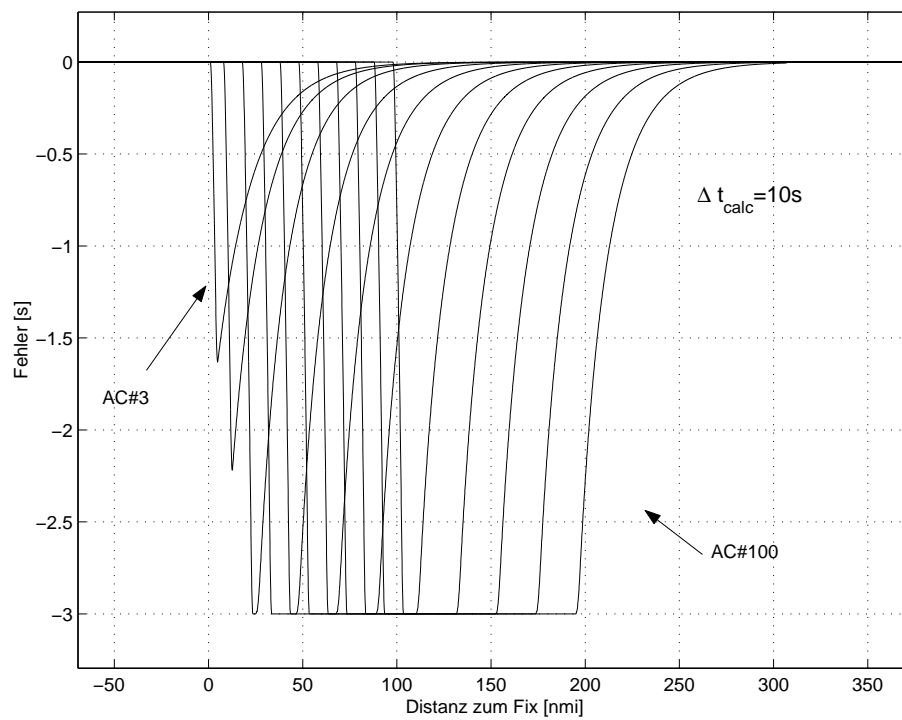


Abbildung 4.8: Fehler im CTD-Verfahren bei einer Kette von 100 Lfz $\Delta t_{calc} = 10s$

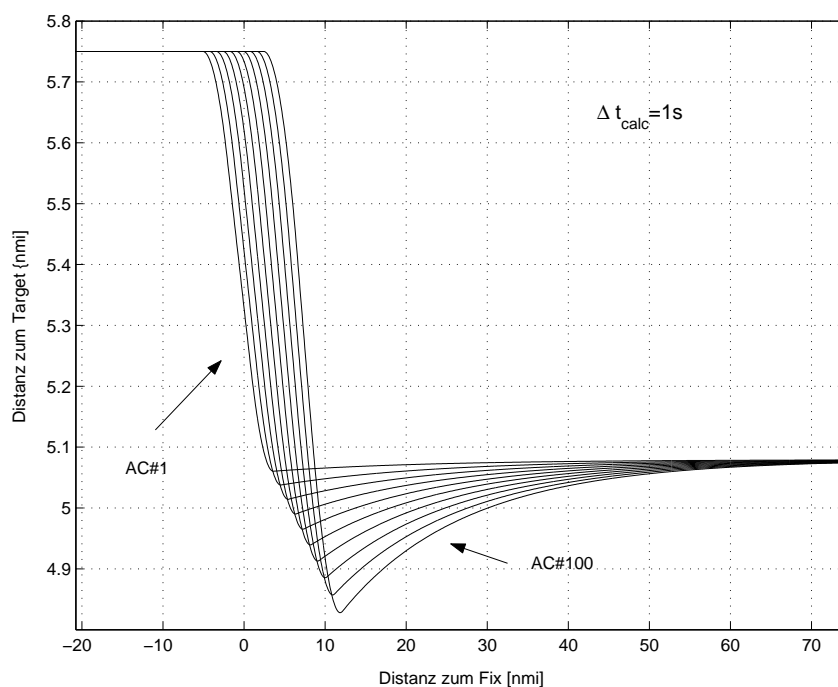


Abbildung 4.9: Distanz zum Target im CTD-Verfahren bei einer Kette von 100 Lfz $\Delta t_{calc} = 1s$

stellen muss, als die Geschwindigkeit des Target. Dieser Effekt pflanzt sich innerhalb der Kette fort und verstärkt sich.

Bei großen Δt_{calc} kann es bereits nach wenigen Lfz dazu kommen, dass die kommandierte Geschwindigkeit niedriger ist als die minimal zulässige Geschwindigkeit (hier 240kts). Die Minimalgeschwindigkeit muss daher länger aufrecht erhalten werden, um den Fehler wieder zu kompensieren.

Der Sollabstand zwischen allen Lfz beträgt 70 Sekunden. Dieser wurde gewählt, da er bei der Referenzgeschwindigkeit des Anflugverfahrens von 265kts über Grund einer örtlichen Separation von 5 nmi entspricht (Radarstaffelung) und somit den Minimalabstand darstellt. Allerdings zeigen Abbildungen 4.9 und 4.10, dass im Fall $\Delta t_{calc} = 1s$ Distanzunterschreitungen von ca 0,3nmi und im Fall $\Delta t_{calc} = 10s$ Distanzunterschreitungen von ca. 0,6nmi auftreten.

Um die Unterschreitung zu kompensieren müsste in einer Kette von 100 Lfz der Mindestabstand deshalb 5,6nmi bei 265kts betragen, was einer zeitlichen Mindestseparation von 78 Sekunden entspricht. Die Mindestseparation welche sich aus den Wirbelschleppenkategorien ableitet, beträgt 77 Sekunden (3 nmi bei Anfluggeschwindigkeiten von typischerweise 140kts Geschwindigkeit über Grund) . Somit ist nicht mit einer durch das ASAS-Verfahren begründeten Kapazitätseinbuße aufgrund einer erhöhten zeitlichen Mindestseparation zu rechnen.

Die Ausführungen zeigen, dass das CTD-Verfahren in dieser Form in einer langen Kette von Lfz aufgrund der zu erwartenden Vorwärtspropagation nur angewendet werden kann, wenn das ASAS-Verfahren zwischenzeitlich neu initiiert wird, wie es in früheren Untersuchungen stets der Fall war.

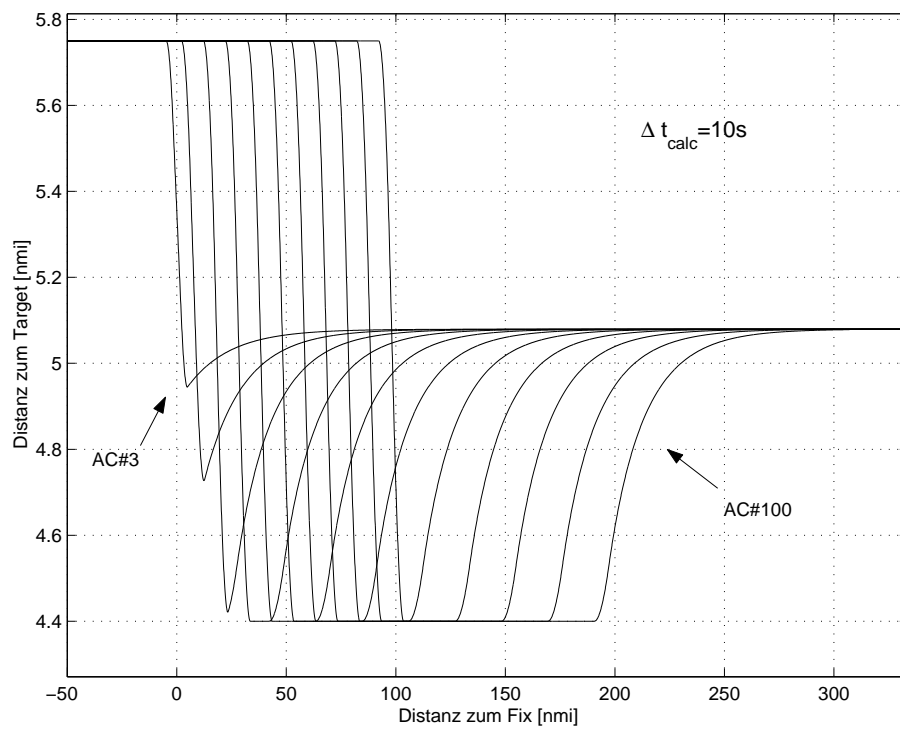


Abbildung 4.10: Distanz zum Target im CTD-Verfahren bei einer Kette von 100 Lfz $\Delta t_{calc} = 10s$

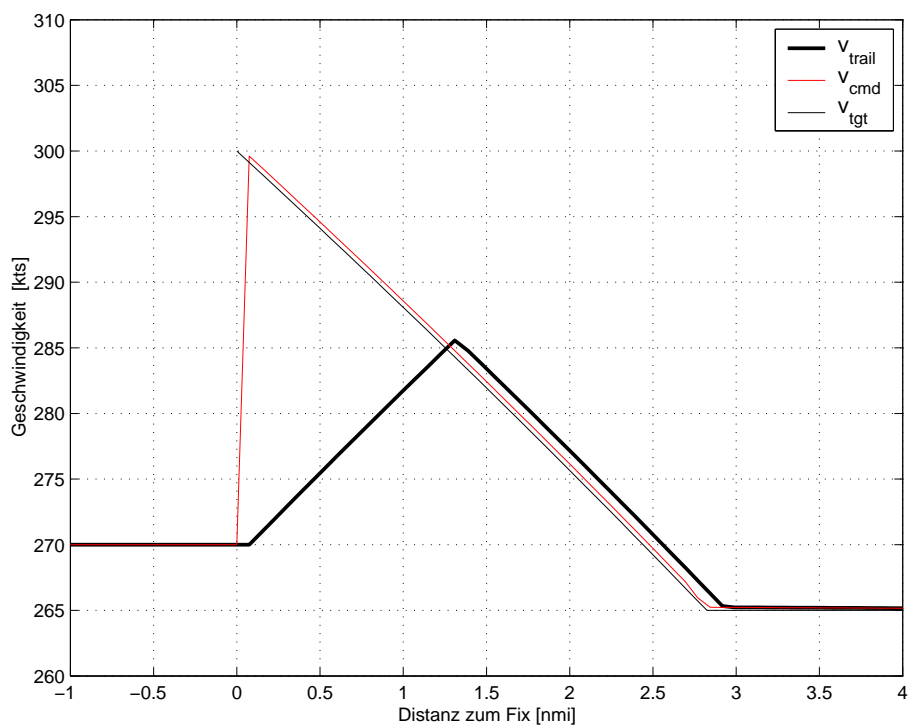


Abbildung 4.11: Geschwindigkeitsverlauf im CTD-Verfahren bei abweichender Initialgeschwindigkeit

Ein weiterer Effekt des CTD-Verfahrens, der durch das Regelgesetz begründet ist, tritt zu Tage, wenn ein Trailing Aircraft eine andere Initialgeschwindigkeit als das Target aufweist (s. Abb. 4.11). Zu Beginn der Regelung (hier am Metering Fix, Distanz=0 nmi) wird das Trailing Aircraft im ersten Berechnungsschritt aufgrund seiner geringeren Geschwindigkeit detektieren, dass ihm das Target Aircraft bei Passieren dieser Position geringfügig voraus war, was durch eine Beschleunigung kompensiert werden muss. Der überwiegende Anteil des Wertes der kommandierten Geschwindigkeit wird laut Regelgesetz jedoch von der Geschwindigkeit des Target an dieser Stelle geprägt. Die Geschwindigkeitskomponente, die aus dem Fehlerterm entsteht ist zunächst klein und wächst an, solange das Target Aircraft eine höhere Geschwindigkeit aufweist als das Trailing Aircraft (maximaler Fehler unter einer Sekunde). Ist der Fehler aber kompensiert, folgt das Trailing Aircraft trotzdem der Geschwindigkeit des Target Aircraft, da dann die kommandierte Geschwindigkeit der Geschwindigkeit des Target Aircraft entspricht.

Bei großen Abweichungen in der Initialgeschwindigkeit führt dieses Verfahren daher zu großen Geschwindigkeitsschwankungen, die wiederum Einfluss auf den Geschwindigkeitsverlauf aller weiteren Trailing Aircraft haben.

Im Hinblick auf Triebwerkslebensdauer und Passagierkomfort ist dies ein unerwünschtes Verhalten. Daher sollte das CTD-Verfahren nur angewendet werden, wenn sich die Geschwindigkeiten von Target und Trailing Aircraft nicht zu stark voneinander unterscheiden.

4.3.2 Modifiziertes Constant Time Delay (MCTD)

Dieser Abschnitt stellt ein Verfahren vor, mit welchem dem, durch die Berechnungsdauer und -frequenz hervorgerufenem, stromabwärts gerichteten Propagationseffekt des Verzögerungspunktes entgegengewirkt werden kann. Hierzu muss im Regelgesetz die Geschwindigkeit des Target an der aktuellen Position des Trailing durch die Geschwindigkeit, die das Target Δt_{calc} Sekunden weiter stromabwärts aufwies, ersetzt werden. Die Geschwindigkeiten zwischen den Datenpunkten des Target werden interpoliert.

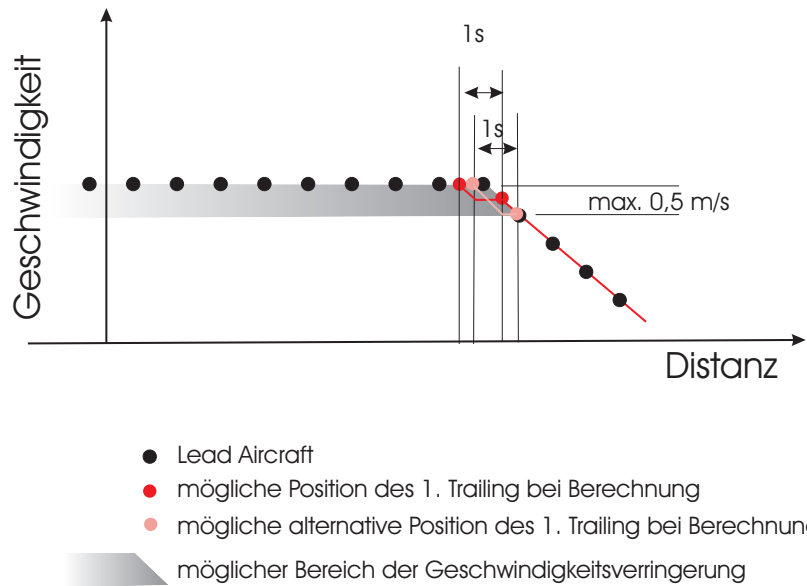
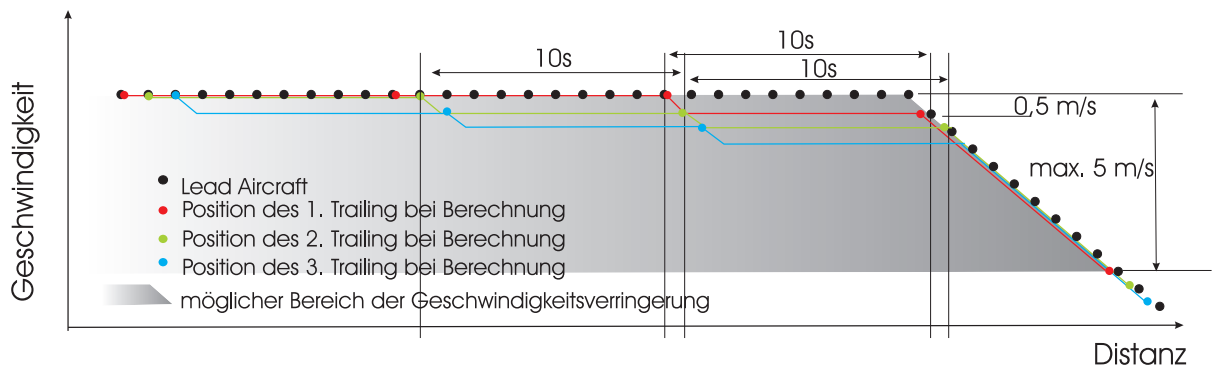
Das Regelgesetz lautet dann

$$v_{cmdMCTD} = v_{tgt}|_{r_{trail} + \Delta r_{\Delta t_{calc}}} + k_p \cdot e_{dCTD} + k_d \cdot \frac{de_{dCTD}}{dt} \quad (4.5)$$

Ein Blockschaltbild zum Regelungsverfahren ist in Anhang B.1 aufgeführt. Die für ein Luftfahrzeugpaar durchgeführte Stabilitätsanalyse des CTD-Verfahrens aus Abschnitt 4.3.1 ist auch hier gültig, da die Änderung der Vorsteuerung keinen Einfluss auf die Stabilität des Systems hat.

Eine hundertprozentige Kompensation des Effektes kann jedoch nur erreicht werden, wenn Abtastzeitpunkt und Einleitungszeitpunkt der Geschwindigkeitsrücknahme genau übereinstimmen. In allen anderen Fällen ergibt sich ein je nach Berechnungsdauer unterschiedlich stark ausgeprägter stromaufwärtsgerichteter Propagationseffekt niedriger Geschwindigkeiten.

Besteht initial kein Fehler, wird die kommandierte Geschwindigkeit des Trailing lediglich durch die Geschwindigkeit des Targets bestimmt. Die kommandierte Geschwindigkeit

Abbildung 4.12: Geschwindigkeitsverringern bei $\Delta t_{calc} = 1s$ Abbildung 4.13: Geschwindigkeitsverringern bei $\Delta t_{calc} = 10s$

bei Einleitung der Verzögerung ist abhängig von der Position des Trailing zum Zeitpunkt des Berechnungsbeginns im Bezug zum tatsächlichen Einleitungspunkt der Verzögerung des Targets. Je nach Asynchronität von Abtastzeitpunkt und Verzögerungspunkt ist der stromaufwärtsgerichtete Propagationseffekt unterschiedlich stark ausgeprägt. Abbildung 4.12 soll dies verdeutlichen. Pro Lfz verhalten sich Fortpflanzungsstrecke und Intensität umgekehrt proportional zueinander.

Bei längeren Berechnungszeiten kann der Einleitungspunkt der Verzögerung im ungünstigsten Fall mit jedem Lfz um Δt_{calc} Datenpunkte stromaufwärts wandern wie Abb. 4.13 zeigt.

Die maximale Geschwindigkeitsunterschreitung aller folgenden Trailing Aircraft entspricht immer dem Verzögerungsvermögen der Lfz über die Dauer eines Berechnungsschrittes.

Bei Δt_{calc} von einer Sekunde ist die Geschwindigkeitsdifferenz zum Leading Aircraft auf ca. 0,5m/s beschränkt. Die maximale Propagation in einer Kette von 100 Lfz beträgt dann bei einer Initialgeschwindigkeit von 300kts nur wenige Meilen.

Bei einer längeren Berechnungszeit von 10s bewegt sich der Bereich der möglichen Pro-

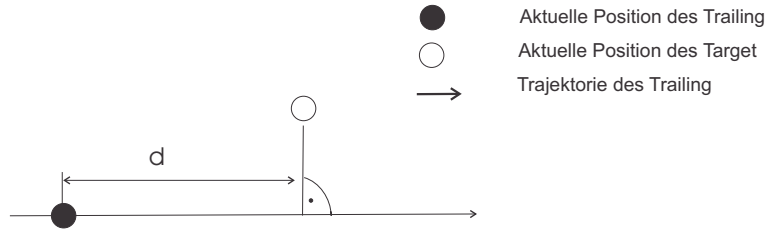


Abbildung 4.14: Abstandsbestimmung bei Cross Track Errors im CTP

pagation in einer Kette von 100 Lfz dagegen zwischen einer Verringerung von ca. 5m/s über wenige Meilen bis zu einer Verringerung von nur ca. 0,5m/s über 80nmi.

Der entstehende stromaufwärts gerichtete Fortpflanzungseffekt ist jedoch im Vergleich zur stromabwärts gerichteten Propagation höherer Geschwindigkeiten sicherheitsunkritisch.

Wichtiger Aspekt des hier demonstrierten Effektes ist die Tatsache, dass die stromaufwärts gerichtete Reduzierung der Geschwindigkeit begrenzt ist. Eine Anwendung des Verfahrens in einer langen Kette von Lfz kann nicht dazu führen, dass sich immer geringere Geschwindigkeiten stetig stromaufwärts fortpflanzen. Die so entstehenden Propagation ist demnach wesentlich weniger gravierend als der durch das CTP-Verfahren (s. 4.3.3) hervorgerufene Effekt.

Das in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Verhalten bei unterschiedlichen Initialgeschwindigkeiten bleibt jedoch bestehen.

4.3.3 Constant Time Predict (CTP)

Beim CTP-Verfahren berechnet sich die kommandierte Geschwindigkeit zu

$$v_{cmdCTP} = v_{trail} + k_p \cdot e_{dCTP} + k_d \cdot \frac{de_{dCTP}}{dt} \quad (4.6)$$

Um die Regelabweichung zu ermitteln, wird beim CTP-Verfahren die Zeit bestimmt, die auf Basis der aktuellen Geschwindigkeit des Trailing vergehen würde, bis das Trailing die aktuelle Position des Target erreicht hat. Die Differenz zum zeitlichen Sollabstand liefert dann den Fehler:

$$e_{tCTP} = \frac{d}{v_{trail}} - \Delta t_{soll} \quad (4.7)$$

Distanzbasiert ausgedrückt ergibt sich

$$e_{dCTP} = r_{tgt} - r_{trail} - \Delta t_{soll} \cdot v_{trail} \quad (4.8)$$

Die Abstandsbestimmung erfolgt durch Projektion der Position des Trailing auf die Trajektorie des Trailing (s. Abb. 4.14).

Im Hinblick auf Sicherheitsaspekte ist diese Art der Fehlerbestimmung wesentlich aussagekräftiger als der Fehler beim CTD-Verfahren, da hier eine Information über die aktuelle

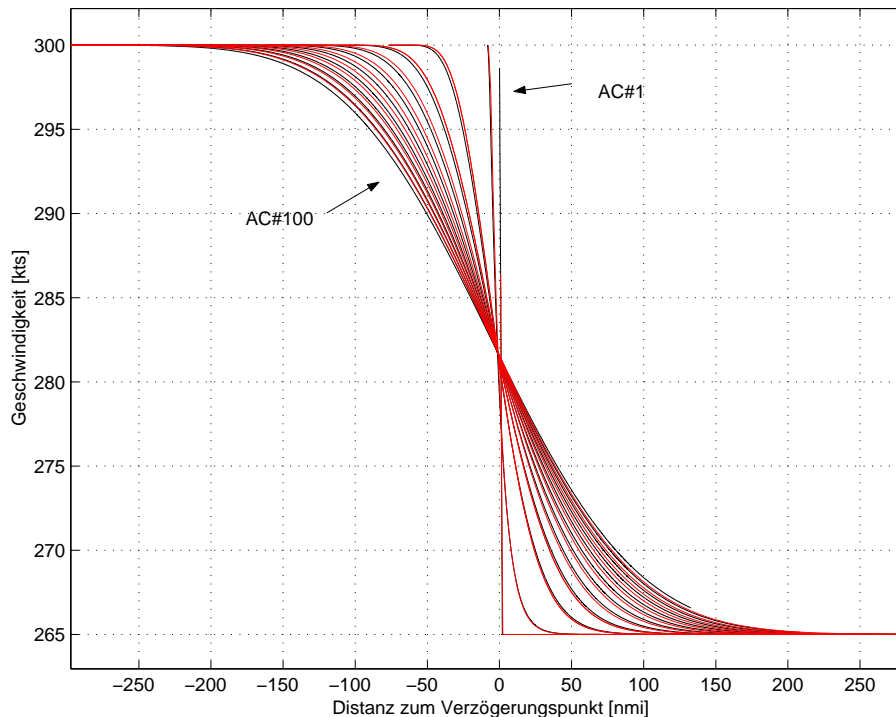


Abbildung 4.15: Geschwindigkeitsverlauf bei CTP bei Bearbeitungszeitschritten von 1 Sekunde (schwarz) und 10 Sekunden (rot)

Position des Target und nicht nur die Positionsinformationen aus der Vergangenheit verarbeitet werden.

Die Regelung mittels PD-Regler ist stabil. Blockschaltbild sowie Stabilitätsbetrachtung eines Luftfahrzeugpaares im angewendeten Regelungsverfahren finden sich im Anhang B.2.

Bei der Regelung nach dem CTP-Verfahren in einer Kette von Lfz tritt der Effekt auf, dass eine Geschwindigkeitsänderung des Target Aircraft stromaufwärts voranschreitet.

Es soll angenommen werden, dass sich eine Kette von Lfz zunächst mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt, und alle Lfz den korrekten Sollabstand hergestellt haben. Reduziert das Leading Aircraft seine Geschwindigkeit nun an einem bestimmten Ort, würde das erste Trailing, das sich noch einige Meilen hinter dem Target befindet, unmittelbar nach Einleiten der Geschwindigkeitsverringerung einen Fehler feststellen (zu dicht aufgeflogen) und bereits an dieser Stelle ebenfalls eine geringere Geschwindigkeit kommandieren. Das Trailing Aircraft, das dem zweiten Lfz folgt, würde im selben Moment ebenfalls die Verringerung der Geschwindigkeit seines Target detektieren und seinerseits eine geringere Geschwindigkeit kommandieren. Dieser Effekt pflanzt sich in der Kette fort.

Das Verhalten tritt auch auf, wenn die Latenzzeit zwischen Aussendung der ADS-B Information und Verarbeitung und Berechnung der neuen kommandierten Geschwindigkeit gleich Null wäre.

Abbildung 4.15 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf einer Kette von 100 Lfz für Berechnungsintervalle von einer Sekunde und zehn Sekunden. Der Ort der Geschwindigkeits-

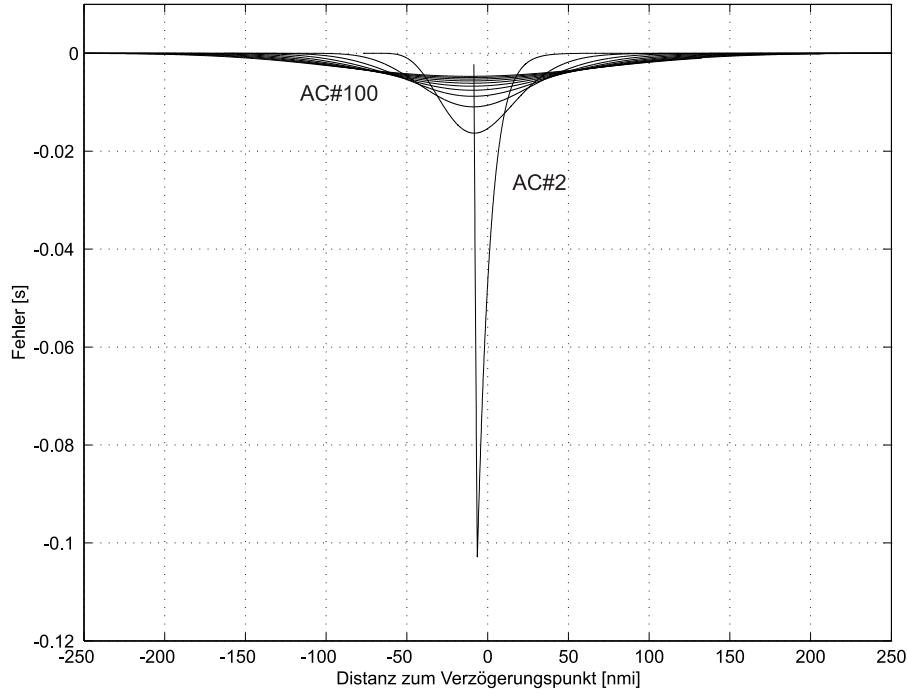


Abbildung 4.16: Fehlerverlauf bei CTP bei Bearbeitungszeitschritten von 1 Sekunde

verringern propagiert in beiden Fällen um ca. 200nmi stromaufwärts. Im Gegensatz zum CTD wirkt sich der Einfluss längerer Berechnungsintervalle beim CTP-Verfahren eher positiv aus, da der Propagationseffekt leicht abgemildert wird. Bei einer Kette von 100 Lfz beträgt der Unterschied jedoch nur ca. 6nmi. Stromabwärts hingegen bleiben die höheren Geschwindigkeiten wesentlich länger erhalten und sind erst ca. 200nmi nach dem Ort der Verzögerung des Leading Aircraft wieder ausgeglichen. Dies ist im Hinblick auf die Sicherheit als kritisch anzusehen.

Anders als beim CTD-Verfahren hat hier der Sollabstand Einfluss auf die Propagation. Große Sollabstände bedeuten eine weitreichende Propagation niedrigerer Geschwindigkeiten.

Die Fehler sind bei langen Verarbeitungszeiträumen erwartungsgemäß größer, wie Abbildungen 4.16 und 4.17 zeigen. Beginnt das Leading Aircraft seine Geschwindigkeit zu verringern kurz nachdem das Trailing Aircraft einen neuen Berechnungsschritt initiiert, wird das Trailing während des gesamten Intervalls seine Geschwindigkeit beibehalten, bis es im nächsten Schritt die Information über die zum Sollabstand veränderte Position seines Target erhält und die Regelung greifen kann, die eine neue Geschwindigkeit für das Trailing kommandiert.

Der Fehler ist dann

$$e_{CTP} = \frac{d - (r_{trail} - r_{tgt})}{v_{trail}} - t_{soll} \quad (4.9)$$

welcher von der Differenz der zurückgelegten Wegstrecken von Target und Trailing in Δt_{calc} abhängt.

Die Fehler wachsen zunächst an. Dies geschieht hier, da, um den Worst Case abzubilden, für das Leading Aircraft die größtmögliche Verzögerung gewählt wurde und nach-

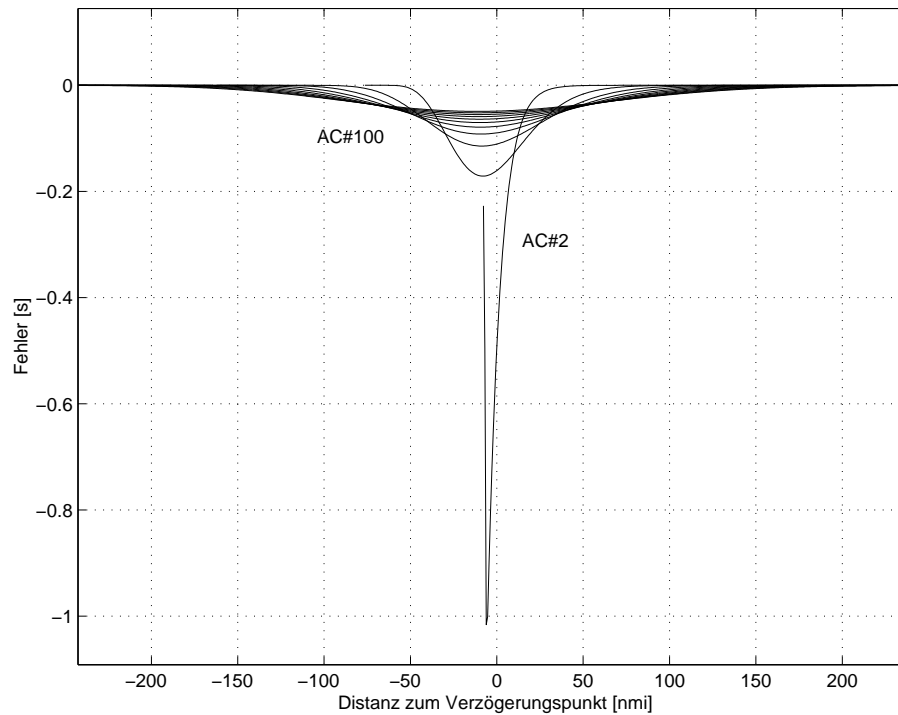


Abbildung 4.17: Fehlerverlauf bei CTP bei Bearbeitungszeitschritten von 10 Sekunden

folgende Lfz nicht stärker verzögern können als das Target. Reduziert das Target seine Geschwindigkeit immer weiter, wächst auch der Fehler weiter an, da nur ein Zeitschritt zur Verfügung steht, um den bis dahin existierenden Fehler zu kompensieren. Bei der Neuberechnung des Fehlers hat sich dieser aufgrund der weiter reduzierten Geschwindigkeit des Target weiter vergrößert. Erst wenn das Target nicht weiter verzögert, kann der Fehler wieder abgebaut werden. Natürlich spielt hier auch die gewählte Verstärkung eine Rolle bei der Entstehung des Geschwindigkeitsverlaufes.

In Abbildung 4.19 sieht man, dass der Fehler bei geringerer Verstärkung zu Beginn stärker zunimmt. Bei größerer Verstärkung entwickelt sich der Fehler langsamer, der Fächereffekt der Geschwindigkeitsverteilung wird jedoch verstärkt (s. Abb. 4.18).

Wie Abbildung 4.20 zeigt, kommt es im Gegensatz zum CTD-Verfahren beim CTP-Verfahren zu keiner Distanzunterschreitung.

4.3.4 Predict Point (PP)

Die Regelung mittels CTP- oder CTD-Verfahren ist nur für den Fall geeignet, dass sich Target und Trailing Aircraft lateral auf derselben Trajektorie bewegen.

Beim Merging von Lfz aus unterschiedlichen Verkehrsströmen kann daher nur eine indirekte relative Regelung zum Einsatz kommen, die sich eines festen Bezugspunktes bedient. Dementsprechend können hier auch keine Ketteneffekte auftreten.

Die distanzbasierte Methode von Hoffman [EH02] wurde zu diesem Zweck auf die hier vorgestellte zeitbasierte Methode übertragen. Die Regelabweichung errechnet sich aus

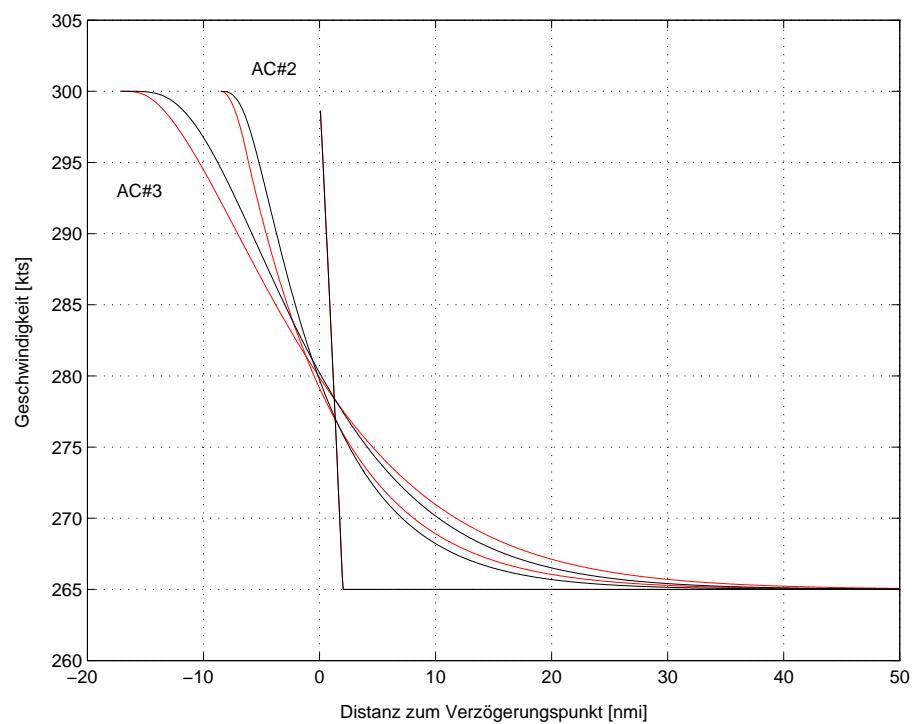


Abbildung 4.18: Geschwindigkeitsverlauf bei CTP und hoher (rot) und geringerer (schwarz) Verstärkung

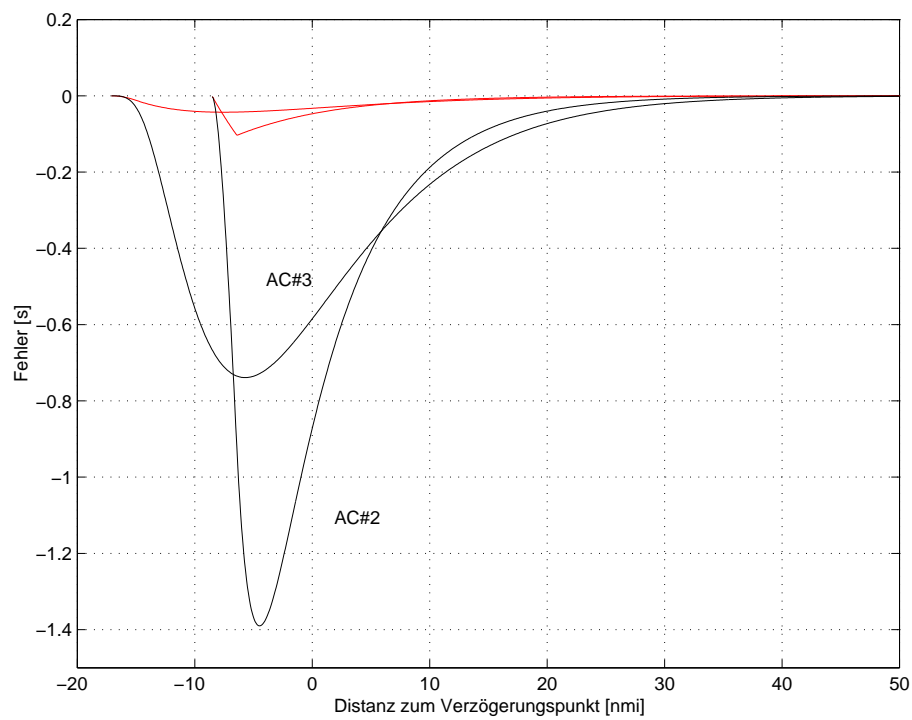


Abbildung 4.19: Fehlerverlauf bei CTP und hoher (rot) und geringerer (schwarz) Verstärkung

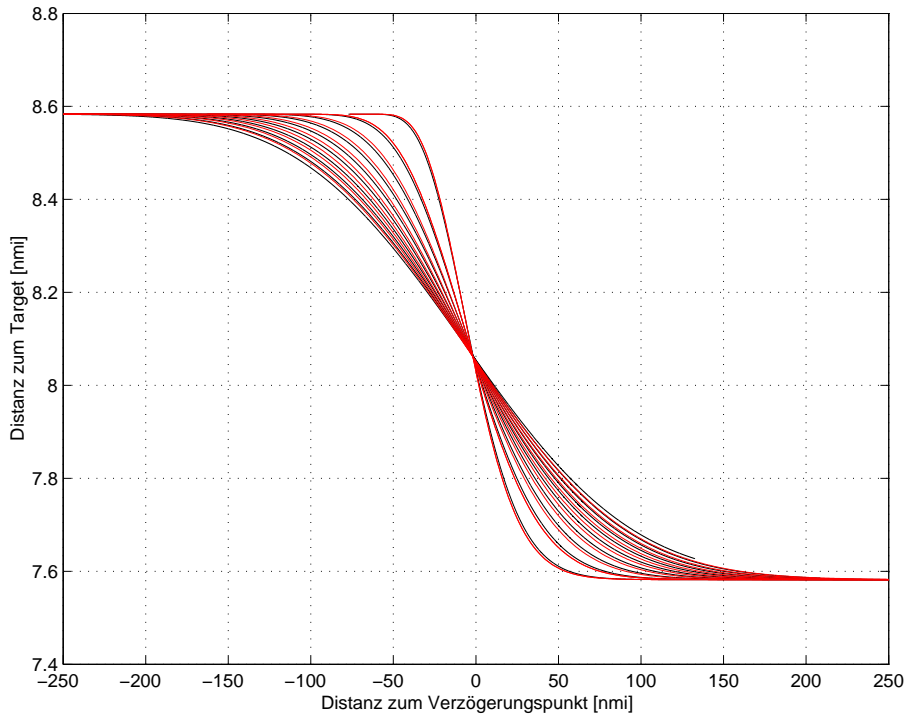


Abbildung 4.20: Distanzverlauf zum Target im CTP bei Bearbeitungszeitschritten von 1 Sekunde (schwarz) und 10 Sekunden (rot)

der Differenz der Ankunftszeitpunkte von Target und Trailing Aircraft und der Berücksichtigung des zeitlichen Sollabstandes.

$$e_{PP} = \frac{d_{trail}}{v_{trail}} - \frac{d_{tgt}}{v_{tgt}} - \Delta t_{soll} \quad (4.10)$$

Dabei bezeichnen d_{trail} und d_{tgt} die jeweils aktuellen Distanzen von Target und Trailing zum Bezugspunkt MF (s. Abb. 4.21).

Die vom Trailing Aircraft zu kommandierende Geschwindigkeitsrücknahme kann bei annähernd konstanter negativer Beschleunigung des Trailing Aircraft (a_{trail}) direkt berechnet werden (Herleitung s. Appendix C). Unter Berücksichtigung von initialer Geschwindigkeit des Trailing und des Verzögerungsvermögens (ohne Forderung einer am Fixpunkt herzustellenden Geschwindigkeit) ergibt sich die erforderliche Geschwindigkeitsdifferenz zu

$$\Delta v_{cmd} = a_{trail} \cdot \Delta t_{trailPP} + \sqrt{a_{trail} \cdot \Delta t_{trailPP}^2 - 2a_{trail}(v_{trail} \cdot \Delta t_{trailPP} - d_{trail})} \quad (4.11)$$

mit

$$\Delta t_{trailPP} = t_{tgt} + \Delta t_{soll} = \frac{d_{tgt}}{v_{tgt}} + \Delta t_{soll} \quad (4.12)$$

sodass

$$v_{cmdPP} = v_{trail} + \Delta v_{cmd} \quad (4.13)$$

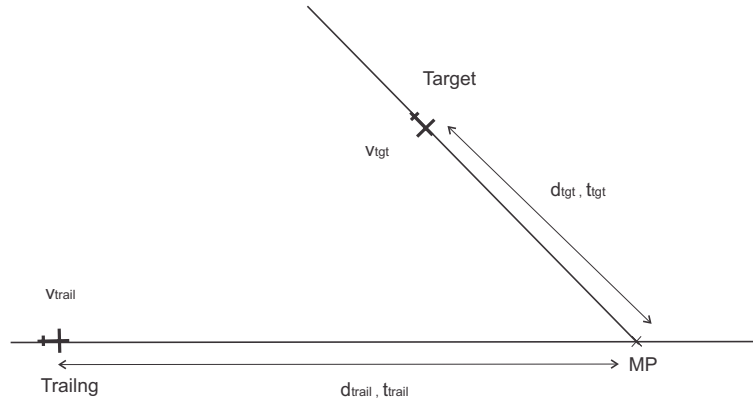


Abbildung 4.21: Prinzip des PP-Verfahrens

Der Anteil der während der Verzögerung auf die Sollgeschwindigkeit zurückgelegten Strecke ist jedoch lediglich bei geringen Initiierungsabständen d_{trail} von Bedeutung, so dass vereinfacht gelten kann

$$v_{cmdPP} = \frac{d_{trail}}{\left(\frac{d_{tgt}}{v_{tgt}} + \Delta t_{soll}\right)} \quad (4.14)$$

Somit ist bei Erreichen der neuen kommandierten Geschwindigkeit der Sollabstand hergestellt.

Bei großen Fehlern kann es jedoch dazu kommen, dass die kommandierte Geschwindigkeit größer oder kleiner ist, als die zulässige Maximal- oder Minimalgeschwindigkeit. In diesem Fall kann der Fehler nicht bis zum Erreichen des Merging Points kompensiert werden. Es bleibt somit ein Restfehler bei Initiierung der darauffolgenden ASAS-Phase erhalten. Im Kapitel 6 wird festgestellt werden, ob diese Situation bei den vorliegenden Randbedingungen in der TMA auftreten kann und inwieweit sie sich auf die Stabilität der Kette auswirkt.

Bei Merging über 180° Turns ohne festen Bezugspunkt soll zur Regelung des korrekten zeitlichen Abstandes auf ein Target jedoch nicht zuerst die Geschwindigkeit genutzt werden sondern es bietet sich an, unter Beibehaltung der Geschwindigkeit die Trombonenstruktur (Gegenanflug) auszunutzen. Anstatt der Geschwindigkeit wird dann die Strecke geregelt, die bei der momentanen Geschwindigkeit des Trailing den korrekten zeitlichen Abstand am Referenzpunkt herstellen würde. Dazu muss der exakte Kurveneinleitungszeitpunkt bestimmt werden. Die Bestimmung des jeweiligen Referenzpunktes für die Regelung ist in Kapitel 5 in Abschnitt 5.4 und Abschnitt 5.5 beschrieben.

Es gilt dass der Turn eingeleitet wird, wenn die Distanz zum Merging Point

$$d_{trail} = v_{trail} \cdot \Delta t_{trailPP} \quad (4.15)$$

beträgt.

4.3.5 Predict Passed Point (PPP)

Das PPP-Verfahren wird angewendet, sobald das Target Aircraft den Bezugspunkt im PP-Verfahren überflogen hat. Es handelt sich auch hier um ein indirektes Verfahren ohne

Ketteneffekt.

Bei dieser Methode wird die herzustellende Geschwindigkeit aus dem erforderlichen Ankunftszeitpunkt abgeleitet, der um den zeitlichen Sollabstand zur bereits erfolgten Ankunft des Targets am Merging Point (MP) (t_{MPtgt}) verschoben ist.

Hier gilt

$$e_{PPP} = t_{MP} - t_{MPsoll} \quad (4.16)$$

wobei

$$t_{MP} = t + \frac{d_{trail}}{v_{trail}} \quad (4.17)$$

und

$$t_{MPsoll} = t_{MPtgt} + \Delta t_{soll} \quad (4.18)$$

mit t_{MP} als der Zeit zu der das Trailing am Fixpunkt sein wird und t_{MPsoll} zu der es laut zeitlicher Separation dort ankommen soll.

In 4.11 muss nun $t_{trailPP}$ durch $t_{trailPPP}$ ersetzt werden, $t_{trailPPP}$ entspricht der aus den ADS-B Informationen berechneten Zeitspanne, die das Trailing Aircraft bis zum Merging Point benötigen soll:

$$\Delta t_{trailPPP} = t_{MPtgt} + \Delta t_{soll} - t \quad (4.19)$$

Vereinfacht gilt

$$v_{cmdPPP} = \frac{d_{trail}}{\Delta t_{trailPPP}} \quad (4.20)$$

somit ist auch hier bei Erreichen der neuen kommandierten Geschwindigkeit der Sollabstand jeweils hergestellt.

Beim Merging unter 180° ist die Distanz zum Target beliebig, da sich die Wegstrecke durch den Eindrehzeitpunkt bestimmt. In diesem Fall soll davon ausgegangen werden, dass das Trailing Aircraft seine momentane Geschwindigkeit beibehält. Die erforderliche Wegstrecke zur Herstellung des Sollabstandes errechnet sich dann zu

$$d_{trail} = v_{trail} \cdot \Delta t_{trailPPP} \quad (4.21)$$

Kapitel 5

Verfahrenskonzepte für ASAS-Phasen bei verschiedenen Rahmenbedingungen

Die in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen zu ASAS bezogen sich in allen Fällen nur auf kurze Phasen eines Anfluges. Vor allem für die Verkehrsabwicklung innerhalb der TMA wurde bisher kein durchgängiges Konzept entwickelt, das das Verhalten der Lfz in der TMA in Abhängigkeit anwendbarer Regelungsmethoden berücksichtigt. Die kurzfristige Bildung von Ketten zur Entlastung der Lotsen erwies sich in den meisten Fällen als kontraproduktiv, da das Herstellen der Ketten und die Führung der Lfz zu einer entsprechenden Position, die die Bedingungen zur Initiierung einer ASAS-Anweisung erfüllte, als umständlich und zeitaufwändig beurteilt wurde.

Alternative Konzepte betrachteten deshalb die Aufrechterhaltung einer individuellen 4D-Trajektorie, die auch lateral den durch die Luftraumstruktur gegebenen Bewegungsfreiraum ausnutzen sollte. Die zeitliche Separation war darin nur durch eine vorgegebene Ankunftszeit auf der Schwelle festgelegt. Eine relative Navigation und Regelung der Separation erfolgte nur im Fall der Separationsunterschreitung. Nach der Lösung des Konfliktes sollten die Lfz den Anflug dann auf der für sie optimalen Trajektorie fortsetzen.

Blickt man in die Zukunft, scheint ein 4D-trajektorienbasiertes ATM System ohne feste Luftstraßen unter Verwendung von ASAS Crossing and Passing Applikationen beim Durchfliegen von Sektoren im Enroute-Bereich ein durchaus umsetzbares Szenario darzustellen. Je mehr räumliche Einschränkungen aber existieren und je dichter der Verkehr ist, umso weniger Spielraum besteht für eine Flugdurchführung nach dem individuellen Optimum. Dies ist vor allem im Flughafennahbereich der Fall, der Gegenstand der vorliegenden Überlegungen darstellt.

Abgesehen vom Verlust der Situational Awareness der Lotsen bei hoher Verkehrslast, würde die Anzahl zu lösender Konflikte stark ansteigen und könnte somit die ehemals als optimal geplante Trajektorie derart modifizieren, dass eine von vornherein nicht 100% optimale Trajektorie innerhalb eines geordneten Verkehrsflusses sich als bessere Lösung erweist. Diese Aussage wurde auch in den im Rahmen von SESAR veröffentlichten Dokumenten niedergelegt, in denen es heißt, (Abschnitt 2.2.4.2.2. in [SES07]) dass eine hohe

Kapazität an einem Flughafen nur auf Kosten aller individuellen Trajektorien erreicht werden kann.

Auf die Gestaltung einer individuellen Trajektorie und deren Einhaltung mittels 4D-FMS muss und soll jedoch nicht völlig verzichtet werden. Es stellt sich lediglich die Frage, ab welchem Punkt des Flugweges die freie Gestaltung der Trajektorie sinnvollerweise in eine auf den umgebenden Verkehr bezogene Trajektorie übergehen sollte. 4D-FMS und ASAS können sich so über den Flugverlauf gegenseitig ergänzen und müssen nicht wie von einigen Autoren publiziert, als konkurrierende Konzepte angesehen werden. Das Konzept soll somit die Akzeptanz für die Verflechtung beider Ansätze fördern und aufzeigen, dass die von vielen gesehenen Nachteile der Verwendung von ASAS in der TMA, nicht zutreffen bzw. im Kontext des hier entwickelten Konzeptes irrelevant sind.

In der vorliegenden Arbeit wird daher eine ganzheitliche Air Traffic Flow Strategy entwickelt, in dem sich die Lfz ab einem zu definierenden Punkt im Anflug jeweils ausschließlich relativ zueinander bewegen. Dieses Konzept soll für den gesamten Flughafennahbereich durchgängig sein und den Flugabschnitt von der Annäherung an das Metering Fix bis zur Landung abdecken.

Ab welchem Punkt die relative Regelung dabei greifen kann, ist abhängig von den prozeduralen und technischen Randbedingungen.

5.1 Unterteilung

Es stellt sich die Frage auf welche Art ein solches Gesamtkonzept sinnvollerweise beschrieben werden kann. In der Literatur (z.B. [TP05]) findet sich in Bezug auf den vorliegenden Kontext eine Vorgehensweise, in der zwischen der Einteilung in eine funktionale Ebene, eine prozedurale Ebene und eine technologische Ebene unterschieden wird. Allerdings sind die drei Ebenen durch die herrschenden Randbedingungen stark miteinander verflochten, sodass stets alle drei Aspekte gleichzeitig beleuchtet werden müssen. Diese Verflechtung bleibt bis auf die Ebene der betrachteten Teilabschnitte eines Anflugverfahrens erhalten. Diese sind

- Merging am Metering Fix
- Merging von Verkehrsströmen innerhalb der TMA
- Remain-Phase
- Final Turn und
- Final Approach and Landing

Die Untersuchung und Bewertung der verschiedenen Konzeptelemente in jeder der Phasen wird im Kontext zum Gesamtkonzept betrachtet, sodass ein möglichst einheitlicher Gesamtablauf gewährleistet werden kann.

ASAS innerhalb TMA erfährt nur dann Akzeptanz, wenn dadurch die Grundaspekte einer sinnvollen Anflugprozedurgestaltung weiterhin Beachtung finden können und und der

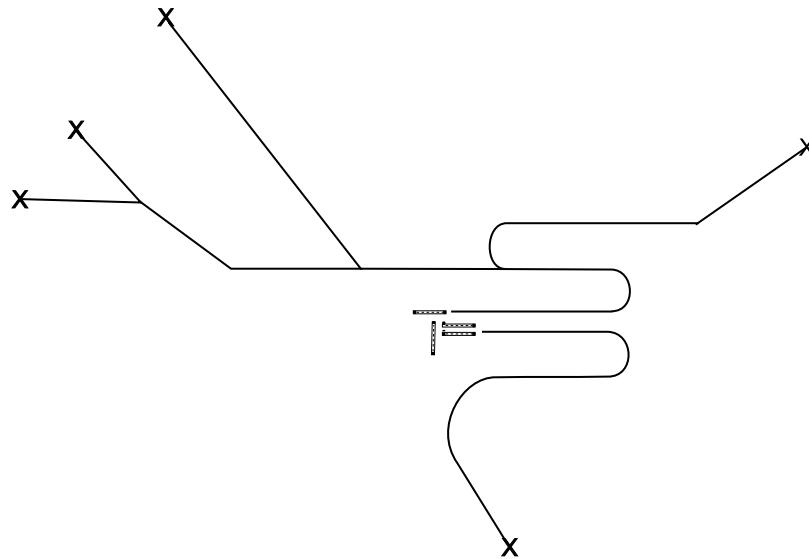


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der RNAV Anflugroutenstruktur und Einflug-Fixpunkte des Flughafens Frankfurt am Main bei Betriebsrichtung 25

erwartete Nutzen für die Anwender nachvollziehbar ist. Trotz festgelegter Routenstrukturen soll eine gewisse Flexibilität weiterhin erhalten bleiben, um auf unterschiedliche Verkehrslasten reagieren zu können.

Hinzu kommt eine gewünschte Variabilität der Anflugrouten, um die Lärmbelastung am Boden zu streuen. Eine möglichst kurze Anflugstrecke innerhalb der TMA liegt dabei im Interesse aller Beteiligten. Auch der Wunsch der Piloten nach einer möglichst individuell gestaltbaren vertikalen Trajektorie bleibt bestehen. Neben der Vereinbarkeit mit den heute praktizierten Anflugverfahren sollte die Verwendung von ASAS keine Ausschlusskriterium für die Einführung neuer Anflugverfahren wie dem Continuous Descent Approach darstellen.

Auch wenn in der vorliegenden Arbeit der Hauptaugenmerk auf der Untersuchung der Anwendbarkeit von ASAS in der Luftraumstruktur des Flughafen Frankfurt Main liegt (schematische Darstellung s. Abb. 5.1), soll das Konzept für die ASAS-Manöver im Hinblick auf die Merging-Geometrien möglichst generischer Natur sein (spitze Winkel und 180° Turns). In Bezug auf den technischen Aspekt bei der Gestaltung der ASAS-Prozeduren sollte der erforderliche Datenaustausch der einzelnen Lfz untereinander sowie mit dem Boden auf ein Minimum beschränkt werden.

Insbesondere die Übermittlung der Information zur Identifizierung der Target Aircraft und deren Abfolge an jedes betroffene Lfz beim Zusammenführen von Verkehrsströmen, stellt sich mit Bezug auf den Datenaustausch vor allem im Hinblick auf die Synchronisierung als Herausforderung dar, vereinfacht die ASAS-Algorithmen jedoch wesentlich. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle zwischen zwei grundsätzlich unterschiedlichen Gestaltungsvarianten von ASAS-Verfahren zum einen mit Kenntnis der Targets und zum anderen ohne Kenntnis der Targets untersucht werden. Im Fall bekannter Targets soll die Übermittlung der gesamten vom AMAN berechneten Sequenz ausgeschlossen werden.

Eine weitere generelle Unterscheidung wird bei der Ermittlung des Abstandes während der ASAS-Manöver vorgenommen. Hier wird das Zusammenführen an festgelegten, in

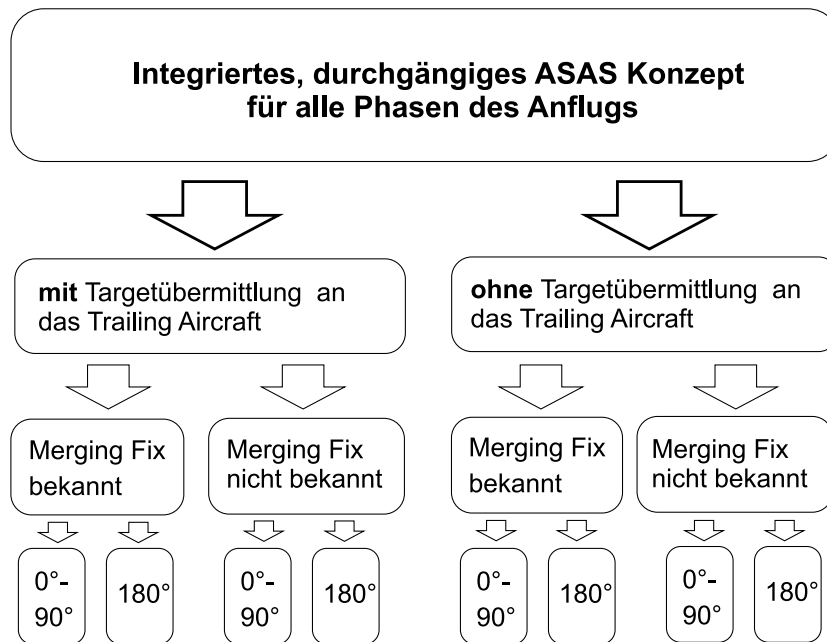


Abbildung 5.2: Unterteilung des Konzeptes in zwei Stränge

einer Anflugprozedur als Wegpunkte veröffentlichten Merging Fix und der Gestaltung von ASAS-Manövern ohne einen festen Merging Fix betrachtet.

Abbildung 5.2 gibt einen Überblick über die beiden Stränge der Konzeptentwicklung.

Im weiteren Verlauf soll nun die Frage beantwortet werden, wie ASAS mit den heute veröffentlichten Flächennavigations-Anflugprozeduren (RNAV) vereinbart werden kann und welche Änderungen vorgenommen werden müssen bzw. welche Einschränkungen gelten, wenn ASAS im Flughafennahbereich angewendet werden soll.

5.2 Merging am Metering Fix

5.2.1 Rahmenbedingungen an der TMA-Grenze

Im flughafennahen Bereich erhöht sich die Verkehrsdichte mit abnehmender Entfernung von den Landebahnen, was komplexe Konfliktlösungen auf Basis frei wählbarer individueller Trajektorien extrem ineffizient und nahezu unmöglich macht. Auch für die Lotsen wäre das Luftverkehrsbild in einer solchen Umgebung nicht antizipierbar und würde letztendlich zu einer Verringerung der Sicherheit führen. Auch SESAR sieht aus diesen Gründen vor, den Verkehr innerhalb der TMA geordnet und strukturiert ablaufen zu lassen. Das bedeutet, dass der Einflug in die TMA in der Regel nach wie vor über definierte Einflugpunkte erfolgen muss. Diese Punkte stellen damit zumindest lateral den spätestmöglichen Endpunkt der individuell optimierten 4D-Trajektorie dar, der zu einem definierten Zeitpunkt erreicht sein muss.

Dieser Zeitpunkt wird dabei heute von einem Arrival Manager (AMAN) festgelegt, der auch im vorgestellten Konzept eine wichtige Rolle spielt. Der Arrival Manager stellt bei

Einflug eines Lfz in dessen Erfassungsbereich (in FRA heute ca. 80nmi vor Erreichen der Einflugpunkte) eine entzerrte Anflugsequenz her, die die Mindeststaffelungen zwischen den Lfz berücksichtigt.

Bei der Sequenzbildung müssen in der TMA mehrere Verkehrsströme zusammengeführt werden. Hierzu bedient sich der AMAN interner Referenztrajektorien sowie Informationen über die momentan aktuelle typische Anflugdauer innerhalb der TMA, die aufgrund der Trombonenstruktur und unterschiedlicher Windverhältnisse variieren kann. Die auf der Landeschwelle berechnete Sequenz wird daraufhin auf die Einflugpunkte zurücktransferrt. Jedem der Lfz wird eine Ankunftszielzeit am Metering Fix zugewiesen, die somit einen zeitlichen Mindestabstand zum vorausfliegenden Lfz impliziert.

Die Einhaltung der vom AMAN vergebenen Zielzeit über dem Metering Fix, für Lotsen und Piloten ausgedrückt in einer „Time to Lose“ (TTL) oder „Time to Gain“ (TTG), ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Sequenz. Heute wird jedoch ausschließlich mit einer TTL gearbeitet. Der Grund dafür besteht darin, dass sich wegen der zum Teil nicht ausreichenden Steuerbarkeitsfenster aber auch durch Veränderungen in der Anflugsituation am Boden an den Einflugpunkten Warteschleifen (Holdings) ergeben. Ein auf der Strecke beschleunigtes Lfz könnte dann unter Umständen am Fix doch wieder zurückgehalten werden, was den Flugverlauf ineffizient gestaltet.

Die Steuerbarkeitsfenster sind neben der Minimum Clean Speed durch die Tatsache begrenzt, dass ein Lfz maximal 5% von der im Flugplan veröffentlichten Geschwindigkeit abweichen darf, ohne einen neuen Flugplan aufgeben zu müssen. Die Anzahl erforderlicher Holdings kann umso mehr reduziert werden, je früher im Flugverlauf die Piloten über ihre Zielzeit am Metering Fix informiert werden, was eine Erweiterung des Erfassungshorizontes des AMAN bedeuten würde. Das Vorhaben, den Radius auf 200nmi auszudehnen wurden innerhalb der DFS bereits diskutiert. Eine Umsetzung ist jedoch bisher nicht erfolgt, da in den Prozeduren die Weitergabe der Ankunftszeiten über mehrere Sektorgrenzen hinweg vorgesehen werden müsste. Eine entsprechende Toolunterstützung existiert bis heute nicht, stellt für die Zukunft jedoch kein unüberwindbares Hindernis dar.

Die zweite Ursache für die Entstehung von Holdings ist die bisher noch unzureichende Koordinierung von Anflug und Abflugmengen. Fehlende Informationen über die Abflugsituation am Boden bzw. fehlende rechtzeitige Zuweisung einer verbindlichen Anflugkapazität erschweren einen ungestörten und kontinuierlichen Zufluss des Verkehrs in die TMA. Dieser Problematik nähert man sich momentan auch im Rahmen von SESAR durch die Einführung eines sogenannten Demand Capacity Balancings, das auf grober Mengengbasis eine optimale Verteilung von Lande- und Abflugkapazität für einen zeitlichen Horizont von einigen Stunden vorsieht.

5.2.2 Aktivierung

5.2.2.1 Szenario mit Übermittlung von Targets

Sind Holdings vermeidbar, kann auch schon weit vor dem Metering Fix mit der Initialisierung von ASAS-Manövern begonnen werden, da gewährleistet ist, dass diese relative Flugführung über die TMA-Grenze hinaus ungestört fortgeführt werden kann.

Die Initialisierung von ASAS-Manövern außerhalb der TMA ist jedoch nur in einer Umgebung möglich, in der die Lfz die vor ihnen liegenden Wegpunkte zumindest bis zum Erreichen des Einflughpunktes via ADS-B übermitteln oder das letzte Flugabschnitt (das letzte „Leg“) vor dem Metering Fix jeweils die erforderliche Mindestlänge aufweist, um Separationsfehler aufgrund der Geschwindigkeit zu kompensieren.

Sehen die Anflugrouten diese Mindestlänge nicht vor, muss bis zum Erreichen des letzten Legs auf die Zielzeit am Metering Fix geregelt werden. Dabei sollte der verbleibende Fehler nicht größer sein, als der auf der verbleibenden Strecke kompensierbare Fehler.

Werden die Wegpunkte im Szenario nicht übermittelt, kann das PP-Verfahren erst bei Beginn des letzten Legs vor dem Metering Fix initiiert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass bis zu diesem Zeitpunkt das 4D-FMS die Ankunftszeit am Metering Fix bis auf eine Genauigkeit von ± 10 Sekunden geregelt hat. Zum Ausgleich dieses Separationsfehlers bei 5% Geschwindigkeitsabweichung vom Flugplan wäre eine Wegstrecke von ca. 50nmi erforderlich.

Dies ist bei der gegebenen Luftraumstruktur schwierig zu realisieren. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass in diesem Fall auch bei der Aktivierung des ASAS-Verfahrens außerhalb der TMA noch Fehler bestehen.

Bei der Zuweisung der zeitlichen Sollabstände im ASAS-Verfahren stellt sich im Fall bekannter Targets die Frage, ob bereits in der Phase „Merging am Metering Fix“ die finalen Staffellingsabstände hergestellt werden sollten.

Folgen zwei Lfz aus der gleichen Anflugrichtung in der Landesequenz direkt aufeinander, würde bei der Herstellung der zeitlichen Separation zwischen zwei „Medium“-Types im Falle reduzierter Radarmindeststaffelung (ca. 65 Sekunden) eine Unterschreitung der, im Bereich der Einflughpunkte regulär geltenden Radarmindeststaffelung (5nmi) stattfinden. Die in der veröffentlichten Anflugprozedur festgeschriebene Mindestgeschwindigkeit beträgt hier 220kts IAS. Bei einer typischen Einflughöhe von FL110 (Flightlevel 110 = 11.000 Fuß) ergibt dies eine Geschwindigkeit über Grund von 265kts GS und damit eine laterale Separation von nur 4,7nmi.

Da es jedoch auf jeden Fall erforderlich ist, den Abstand von 5nmi einzuhalten, müsste der zusätzliche Abstand von 0,3 Meilen z.B. beim Eindrehen auf die Anfluggrundlinie wieder kompensiert werden. Ist das nicht der Fall entsteht ein Kapazitätsverlust.

Bei der Korrektur des Abstandes auf den Mindeststaffelungswert würde die Transitionsroute dabei jedoch jeweils um einen geringen Betrag verkürzt, was in der Kette nicht beliebig oft durchgeführt werden kann.

Aufgrund dieser Überlegungen scheint es erforderlich, von vornherein zwischen allen Lfz einen mittleren Staffellingsabstand herzustellen, der immer größer ist als 65 Sekunden, so dass keine Gefahr der Unterschreitung der Radarmindeststaffelung besteht. So muss bei der Herstellung des endgültigen Abstandes beim späteren Eindrehen auf Endanfluggrundlinie (Final) je nach Lfz-Paarung der Abstand verkürzt oder verlängert werden.

Bei der Berechnung der Standardseparation spielt der Mix von „Medium“(M) und „Heavy“(H) Lfz eine Rolle. Am Flughafen Frankfurt ist in der Regel von einem Anteil an Lfz der Wirbelschleppenkatégorie „Medium“ von 70% und einem Anteil an „Heavys“ von 30% auszugehen. Nutzt man diese Werte zur Gewichtung der Separationen, die bei den Paarungen H-H, H-M, M-M und M-H eingehalten werden müssen, ergibt

sich eine Standardseparation auf der Landeschwelle von 3,5nmi oder 90 Sekunden bezogen auf eine typische Endanfluggeschwindigkeit von 140kts. Umgerechnet auf eine Referenzgeschwindigkeit von 265kts über Grund (ca. 220kts IAS in FL 100) ergibt dies eine Standardseparation von 6,6nmi.

Wird die endgültige Staffellung nicht bereits von Beginn an hergestellt, lässt dies zudem einen größeren Spielraum für die Optimierung von integrierten An-/Abflug-Sequenzen offen. Detaillierte Informationen über Typ und Anzahl der an der Startbahnschwelle befindlichen Lfz stehen aufgrund unvermeidlicher Prozessschwankungen am Boden erst ca. 10 Minuten vor dem Ereignis zur Verfügung. Bei früher beginnender Optimierung der Sequenz könnte es demnach zu Instabilitäten in der Kette kommen, wenn Sollwerte korrigiert werden. Der Zeitraum von ca. 10 Minuten entspricht in etwa der Phase des Endanfluges, sodass der Zeitpunkt für die Herstellung des endgültigen Sollwertes bei Eindrehen auf das Final ideal ist.

5.2.2.2 Szenario ohne Übermittlung von Targets

Eine Regelung auf das Target vor Erreichen des Metering Fix scheidet in einer Umgebung ohne Übermittlung von Targets aus. Da die Targets und deren Abfolge nicht übermittelt werden, sind auch die Sollabstände zu automatisch identifizierten Targets nicht bekannt. Ohne die Einhaltung von Toleranzgrenzen in Bezug auf den Geschwindigkeitsverlauf bis dorthin, kann der vom AMAN intern vorgesehene Sollabstand nicht antizipiert werden (vgl. Abschnitt 5.4). Dies schränkt jedoch die effiziente Trajektoriengestaltung vor dem Metering Fix zu stark ein.

Eine relative Regelung außerhalb der TMA ist daher nur möglich, wenn die Targets bekannt sind.

Bis zum Erreichen des Einflugpunktes richten sich die Trailing Aircraft im Szenario ohne Übermittlung von Targets ausschließlich nach der vom AMAN vorgeschriebenen Ankunftszeit am Metering Fix (bzw. der TTL).

5.2.3 Regelungsverfahren

Die Phase „Merging am Metering Fix“ ist somit nur im Szenario mit Übermittlung von Targets relevant. Sie dauert an, bis das Target das Metering Fix erreicht hat.

Ab diesem Zeitpunkt befindet sich das Target auf der Trajektorie des Trailing und das weitere Verfahren ist demnach der Intrail-Phase zuzurechnen, obwohl das Trailing selbst die TMA noch nicht erreicht hat. Es ist eine ASAS-Funktion vorzusehen, die eine zugewiesene relative zeitliche Separation zu dem in der AMAN Teilsequenz (pro Metering Fix) voranstehenden Lfz herstellt. Da Target und Trailing lateral unterschiedliche Trajektorien aufweisen können, bevor das Target das Metering Fix erreicht, muss in dieser ersten Phase auf ein indirektes Regelungsverfahren zurückgegriffen werden. Hierbei wird das Metering Fix selbst als Bezugspunkt zur Hilfe genommen.

Ein direktes CTP-Verfahren (vgl.4.3.3) entfällt daher aufgrund der eventuell unterschiedlichen Anflugrichtungen.

Es stehen hier lediglich zwei Arten der Regelung zur Auswahl.

5.2.3.1 PP

Bei Verwendung des PP-Verfahrens (Abschnitt 4.3.4) bietet sich das Metering Fix als Referenz an. Die momentane zeitliche Abweichung vom Sollwert ergibt sich dann aus den erwarteten Flugzeiten bis zum Fix auf Basis der jeweiligen Geschwindigkeiten nach Gleichung 4.10. Die Geschwindigkeitsvorgabe errechnet sich aus Gleichung 4.14.

Die Distanz zum Target und die Geschwindigkeit des Target können direkt aus den empfangenen ADS-B Informationen abgeleitet werden.

5.2.3.2 CTD

Die zweite Möglichkeit zur Bestimmung der Regeldifferenz besteht in der CTD Methode, die aufgrund der unterschiedlichen Trajektorien jedoch nur indirekt zur Anwendung kommen könnte. Hier muss aus den aufgezeichneten Daten des Target der Zeitstempel extrahiert werden, bei dem der Abstand zum Metering Fix dem momentanen Abstand des Trailing zum Fix entsprach. Dieser Zeitstempel bestimmt dann die Regeldifferenz.

Bei einer Regelung auf Basis eines indirekten CTD würde jedoch der Effekt auftreten, dass nach Beseitigung der Regeldifferenz durch eine Verzögerung auf die minimal oder maximal zugelassene Geschwindigkeit ein Kopieren des Target-Geschwindigkeitsprofils über Grund erfolgen würde. Dieses Vorgehen ist für das Trailing jedoch nicht effizient und könnte zudem zu einer zu großen Abweichung von der im Flugplan angegebenen Geschwindigkeit führen. Ein CTD-Verfahren ist für diese Phase des Anfluges demnach nicht geeignet.

In Abschnitt 5.2 wurde entschieden, dass auch im Fall bekannter Targets bis zum Erreichen des Final Turn mit Standardsollabständen gearbeitet wird.

5.3 Intrail-Phasen

5.3.1 Aktivierung

5.3.1.1 Szenario mit Übermittlung von Targets

Nach jedem abgeschlossenen Merging-Vorgang folgt eine Intrail-Phase, in der ein „Remain Behind“ Verfahren ausgeführt wird. Sie beginnt, sobald sich das Target der Trajektorie des Trailing bis auf die mindestens erforderliche Distanz genähert hat. Dies gilt auch am Metering Fix.

Weist die Trajektorie des Trailing einen Lärmfächer auf (s. Abschnitt 5.4), muss der Trajectory Change Point erreicht sein, bevor ein aus dem anderen Verkehrsstrom stammende Target intrail aktiviert werden darf.

5.3.1.2 Szenario ohne Übermittlung von Targets

Das ASAS-Verfahren im Flughafennahbereich beginnt im Fall unbekannter Targets immer mit einer Intrail-Phase, da der Merging-Vorgang am Metering Fix entfällt.

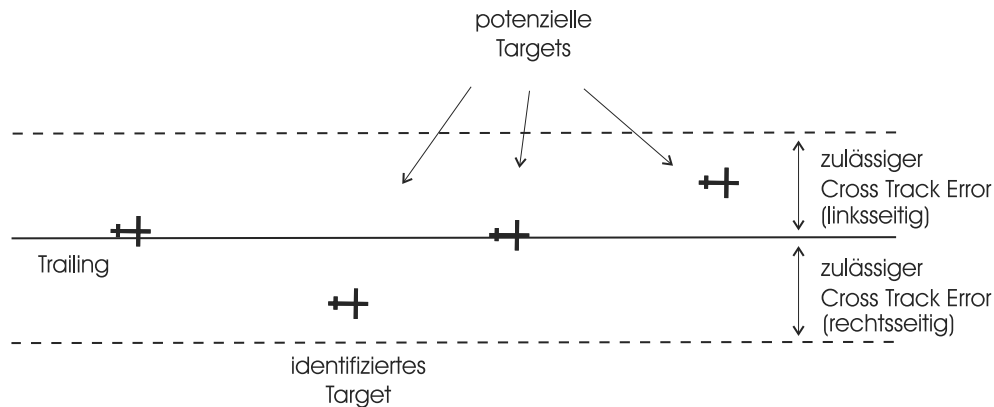


Abbildung 5.3: Intrail Targetidentifikation

Die Intrail-Phase ist aktiviert, wenn das Lfz innerhalb der Cross Track Error Toleranz identifiziert wurde, welches die geringste Distanz zum Trailing entlang dessen verbleibender Trajektorie aufweist (s. Abb. 5.3). Im Fall nicht bekannter Targets müssen alle in der TMA befindlichen Lfz diesbezüglich überprüft werden. Ein Lfz wird als in der TMA befindlich angesehen, wenn es einen festgesetzten Radius in bestimmten Sektoren um den Airport Reference Point (ARP) unterschreitet (s. Abb. 5.4).

Der Sollabstand ist der Wert, bestehend aus Vielfachen des mittleren Staffellungsabstandes, der dem momentan identifizierten Abstand am nächsten kommt (s. Abb. 5.5). Die Ankunftsgenauigkeit der Lfz am Metering Fix muss eine genaue Identifizierung des beabsichtigten Abstandes in Vielfachen der „Standardlücke“ (d_{std}) von 6,6nmi erlauben.

Wendet man hierfür ein Raster mit Rastergrenzen von $\pm 3,2\text{nmi}$ (0,1nmi Puffer), besteht ausreichend Spielraum. Ein zweifacher Standardsollabstand könnte demnach bei Distanz zum Target zwischen 10nmi und 16,4nmi detektiert werden.

Es muss sichergestellt sein, dass durch Ankunftsungenauigkeiten am Fix und durch die Geschwindigkeitsprofile der Lfz am Fix nach Passieren desselben keine Positionsfehler entstehen, durch die die Rastergrenzen verlassen werden, bevor eine Targetaktivierung stattfindet.

Da die Lfz am Metering Fix einen Geschwindigkeitsbereich zwischen 240kts und 360kts aufweisen können, muss die mögliche Fehlerentwicklung auf dieser Basis betrachtet werden.

Bei geringstmöglicher Verzögerung von $0,5\text{m/s}^2$ könnte ein mit 360kt in die TMA eintretendes Target diese Geschwindigkeit noch 10s aufrecht erhalten, bevor es die Verzögerung einleitet. In Verbindung mit einer um 10s zu frühen Ankunft des Target und 10s Verspätung des Trailing ergäbe sich eine Abweichung vom Sollabstand von unter 3nmi, so dass keine weitere Einschränkung des Geschwindigkeitsbereiches gefordert werden muss.

Der beabsichtigte zeitliche Sollabstand, der für die Regelung herangezogen werden soll, steht damit fest (6,6nmi entsprechen 90s).

Bei nicht übermittelten Targets muss die Targetidentifikation auch in der fortgesetzten Intrail-Phase ein kontinuierlicher Prozess sein, da weitere Lfz zwischen bisherigem Target und Trailing einscheren können.

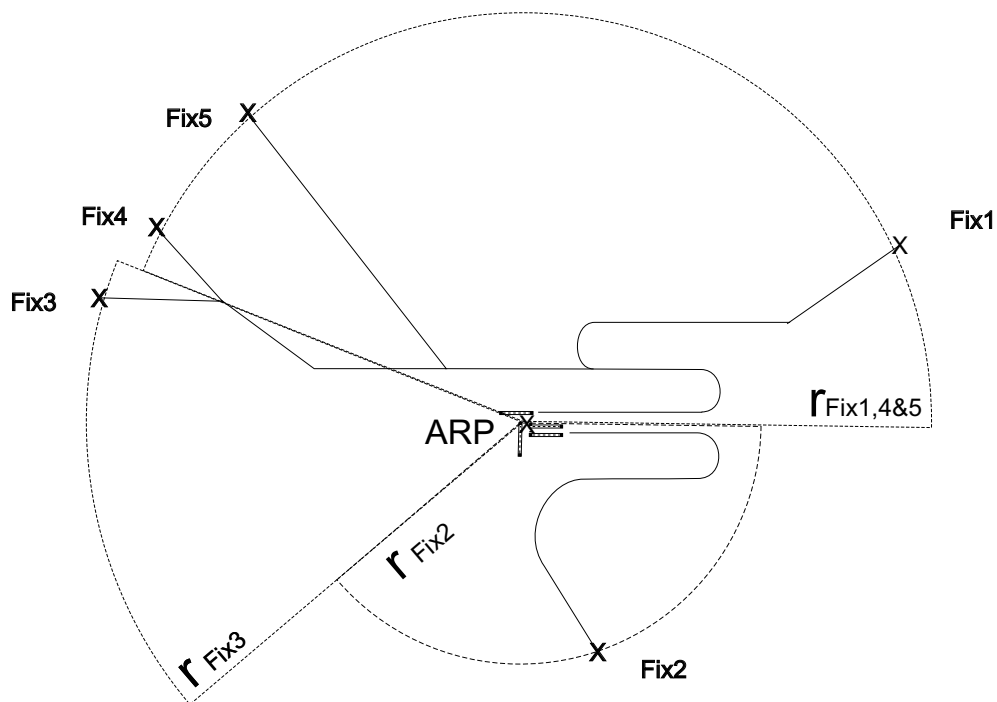


Abbildung 5.4: Sektoren zur Identifikation ob Lfz in TMA

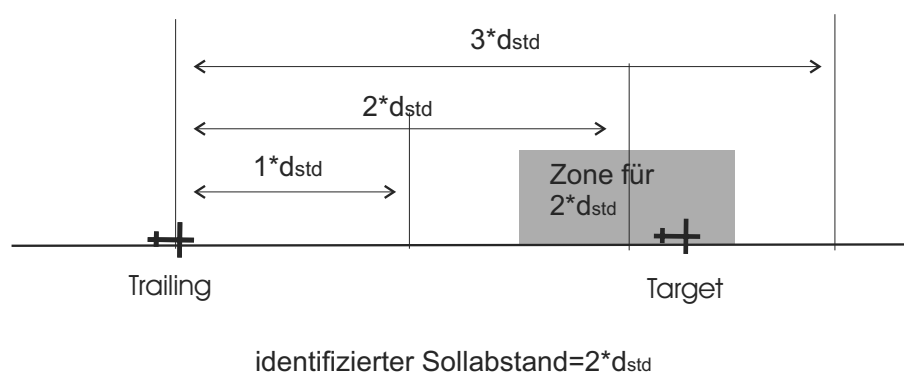


Abbildung 5.5: Identifizierung des Sollabstandes

Geht einer Intrail-Phase eine Merging-Phase mit demselben Target voraus, bleibt der in der Merging-Phase bestimmte Sollabstand erhalten.

Da der Fall eintreten kann, dass kein vorheriges Target existiert, muss es daher Teil der Anflugprozedur sein, die Geschwindigkeit bei Erreichen des Einflugpunktes auf die Referenzgeschwindigkeit zu verringern bis ein Target identifiziert werden kann.

Für Trajektorien mit Lärmfächer gilt für den Wechsel des Targets das Gleiche wie im Fall mit Übermittlung von Targets.

5.3.2 Abbruch

Eine Intrail-Phase endet, wenn sich das Target um mehr als die zulässige Cross Track Distanz von der Trajektorie des Trailing entfernt. Das Target wird entkoppelt.

Bei einer Sequenz von Target und Trailing in welcher beide einen 180° Turn aus der gleichen Anflugrichtung ausführen, muss im Grunde genommen auch von einer Intrail-Phase gesprochen werden. Allerdings lässt sich nicht bestimmen, ob das Target sich noch auf der Trajektorie des Trailing befindet, sobald das Target die Kurve eingeleitet hat. Die Trajektorie des Trailing kann prinzipiell jedes Kurvensegment sein, das eine Verbindung zwischen den zwei parallelen Legs herstellt.

Aus diesem Grund wird, wenn zwei aufeinanderfolgende Lfz aus dem selben Verkehrstrom stammen, das eigentliche Intrail-Verfahren entkoppelt. Es kommen dann die Verfahren zum Einsatz wie in Abschnitten 5.4.13, 5.4.14 und 5.5 beschrieben.

Ist das Target entkoppelt, behält das Target den momentanen Kurs bei, bis das nächstfolgende Target identifiziert ist und ein neues ASAS-Manöver initiiert wird. Jedoch kann es vorkommen, dass das neue Target mit dem alten Target identisch ist.

Die letzte Intrail-Phase folgt nach dem Final Turn. Diese wird abgebrochen, sobald das Trailing die höchste Anfluggeschwindigkeit aller Lfz-Typen erreicht hat.

5.3.3 Regelungsverfahren

Es sollen verschiedene Regelungsverfahren hinsichtlich möglichst zügiger Fehlerkompensation und eine schnellere Angleichung der Geschwindigkeiten an die Referenzgeschwindigkeit des Lead Aircraft diskutiert werden.

5.3.3.1 CTP

Das CTP-Verfahren kann nur angewendet werden, wenn der Abstand zum Target nicht größer ist, als die verbleibende Flugstrecke bis zur Landeschwelle.

Beim CTP-Verfahren ist die Besonderheit beim Konzept des variablen Kurses im Lärmfächer zu beachten (Vorgriff zu Abschnitt. 5.4.10). Generell gilt bei der Abstandsbestimmung im CTP immer die Projektion der Position des Target auf die Trajektorie des Trailing.

Bewegen sich zwei Lfz (intrail) entlang einer Route die einen TCP (Fächer) enthält, bezieht das Trailing die Abstandsbestimmung vor Erreichen des Targetwechsellpunktes an

der Fächerspitze (TCP) immer auf die Standardtrajektorie (STD), da kein Trackfollowing praktiziert wird und der Fächertrack des Trailing erst am TCP entschieden wird (vgl. Abb. 5.24). Fliegt das Target einen von der Standardtrajektorie abweichenden Track, kann es beim CTP-Verfahren zu großen Cross Track Distanzen (xtd) kommen.

Das CTP-Verfahren sollte in dieser Phase jedoch nicht ausgesetzt werden, damit die relative Regelung weiter aufrecht erhalten bleibt. In der eigenen Trajektorie müssen daher die TCPs, auf die jeweils ein Fächer-Standardleg folgt, sowie der Endpunkt des Fächer-Streckenabschnitts bekannt sein. Auf diesen Streckenabschnitten sind für das Target große xtd zugelassen, ohne dass das Target entkoppelt wird.

Durch die Projektion entstehen, je nach Geometrie, Fehler in der Bestimmung des Abstandes zum Target. Die Simulation soll zeigen, ob der dadurch entstehende Fehler die Randbedingungen am TCP erfüllt und wie stark sich dieser Effekt in der Kette auswirkt.

Das CTP-Verfahren kann ausgeführt werden, sobald sich das Target auf der Trajektorie des Trailing befindet.

Beim Merging am Metering Fix im Fall übermittelter Targets muss die PP-Methode, die beim Anflug auf das Metering Fix zum Einsatz kommt, spätestens aufgegeben werden, sobald das Target das Metering Fix erreicht.

Da beim Anflug über dasselbe Fix größere Abstände zwischen den Lfz bestehen können, weil innerhalb der TMA weitere Verkehrsströme integriert werden, die diese „Lücken“ füllen kann es vorkommen, dass große räumliche Abstände zwischen Target und Trailing bestehen. Ein CTP-Verfahren an dieser Stelle würde dazu führen, dass das Verhalten der Lfz innerhalb der TMA aufgrund der bekannten Effekte des CTP bereits Auswirkungen auf die Trailing Aircraft außerhalb der TMA in unterschiedlichen Abständen zum Metering Fix haben würde. Dies ist nicht erwünscht, da zwei unterschiedliche Personen/Rollen für die Kontrolle der Lfz außerhalb und innerhalb der TMA verantwortlich sind. Die Nachvollziehbarkeit des Verhaltens der Lfz wäre dann nicht mehr gewährleistet. Ein CTP-Verfahren ist daher vor Erreichen des Einflugpunktes nicht geeignet.

5.3.3.2 CTD

Da im Szenario mit Übermittlung von Targets alle Targets von vornherein bekannt sind, kann die Aufzeichnung von Vergangenheitsdaten für ein CTD-Verfahren jederzeit problemlos erfolgen.

Im Szenario ohne Übermittlung von Targets muss in der ersten Intrail-Phase das Trailing jedes Lfz, das das Metering Fix überfliegt, beobachtet werden. Soll das Trailing bei Erreichen des Einflugpunktes ein CTD-Verfahren beginnen, müssen die Positionsdaten eines Lfz ab dem Metering Fix so lange aufgezeichnet werden, bis ein weiteres in der Sequenz vor dem Trailing stehendes Lfz das Metering Fix erreicht. In diesem Fall werden die soeben aufgezeichneten Daten verworfen und der Prozess beginnt von Neuem.

Ein CTD-Verfahren kann jedoch immer erst begonnen werden, wenn das Trailing selbst den Merging Point erreicht hat.

Bis zu diesem Punkt stehen das CTP oder auch das PPP-Verfahren zu Verfügung.

Bei bekannten Targets und Anwendung eines ASAS-Verfahrens außerhalb der TMA scheidet ein CTD vor Erreichen des Einflugpunktes aufgrund der Überlegungen aus Abschnitt 5.2.3.2 an dieser Stelle ebenfalls aus.

5.3.3.3 PPP

Sobald ein Lfz die Trajektorie des Trailing erreicht, wird dieser Datenpunkt gespeichert und zur Regelung herangezogen. Befindet sich das Trailing an diesem Punkt, darf wieder auf das CTD-Verfahren gewechselt werden. Allerdings kann es vorkommen, dass wenn ein Lfz die Trajektorie des Trailing erreicht, die Bedingungen zur Aktivierung des neuen Target noch nicht erfüllt sind (Lärmfächer, s. Abschnitt 5.4.10). Als Referenzpunkt dient jedoch immer der Punkt, an dem sich das Target zum erlaubten Wechselzeitpunkt befindet. Die Aufzeichnung der Targetdaten muss dann erst zu diesem Zeitpunkt beginnen.

Obwohl das PPP-Verfahren bereits Teil der Intrail-Phase darstellt, wird auf die Identifizierung des jeweiligen Referenzpunktes aufgrund der engen Verknüpfung mit dem Merging-Vorgang in den Abschnitten 5.4 und 5.5 eingegangen.

Im Szenario mit Übermittlung von Targets kommt für die erste Intrail-Phase am Metering Fix, wenn sich das Trailing noch außerhalb der TMA befindet, nur der Einsatz der PPP Methode in Frage (vgl. Abschnitt 4.3.5). Die Methode kann angewendet werden, bis das Trailing selbst das Metering Fix erreicht hat.

Dazu werden die ADS-B Informationen benötigt, die dem nächsten Annäherungspunkt des Target an das Metering Fix entsprechen. Voraussetzung hierfür ist das Aufzeichnen der ADS-B Informationen des Target, sobald dieses das Metering Fix erreicht hat (einzelner Datenpunkt). Eine Aufzeichnung von Daten über diesen Punkt hinaus ist nur erforderlich, wenn im Anschluss ein CTD-Verfahren durchgeführt werden soll.

Auch wenn zwei aufeinanderfolgende Lfz einen 180° Turn ausführen kommt das PPP-Verfahren zum Einsatz sobald sich das Target wieder eindeutig auf der Trajektorie des Trailing befindet.

5.4 Merging von Verkehrsströmen innerhalb der TMA

Die Überlegungen zu Merging von Verkehrsströmen innerhalb der TMA werden in zwei grundsätzliche Merging-Geometrien unterteilt. Es soll sowohl die Zusammenführung von Verkehrsströmen in spitzen Winkeln (0° bis 90°) betrachtet werden, als auch das Merging mittels Eindrehen aus der Gegenanflugrichtung, was einem 180° Turn entspricht. Winkel zwischen 90° und 180° sind außer acht gelassen, da die Zusammenführung von Verkehrsströmen unter diesen Winkeln erhöhte Konfliktgefahr birgt. Es werden nun zunächst die sich aus der Datenverfügbarkeit ergebenden möglichen Vorgehensweisen in jedem der in Tabelle 5.1 aufgeführten Fälle erarbeitet. Die Auswahl der geeignetsten Lösung für eine Untersuchung im Hinblick auf das Verhalten in der Kette erfolgt in Kapitel 6.

Sind in der Anflugprozedur dedizierte Merging Fixes veröffentlicht (Fälle I bis VIII), können diese als direkte Bezugspunkte für eine zeitbasierte Regelung verwendet werden.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
0-90	x	x	x	x					x	x	x		
180					x	x	x	x				x	x
Targetliste bekannt	x	x			x	x			x	x		x	
Merging Fix bekannt	x	x	x	x	x	x	x	x					
Waypoints der Lfz bekannt	x		x		x		x						
Target des Target bekannt										x			
D_{ist} des Target bekannt										x			

Tabelle 5.1: Verschiedene Randbedingungen für das Zusammenführen von Verkehrsströmen

Ist ein Merging Point nicht bekannt, muss dieser zunächst vom Trailing Aircraft identifiziert werden. Das konkrete Vorgehen ist jeweils davon abhängig, welche weiteren Daten dem Trailing Aircraft zur Verfügung stehen.

Mit Ausnahme von Fall X kann beim Merging lediglich ein PP-Verfahren angewendet werden. Auf die Ermittlung des jeweiligen Referenzpunktes, der für die Bestimmung des zeitlichen Abstandes erforderlich ist, wird in den Fallbeschreibungen einzeln eingegangen.

5.4.1 Targetwechsel

Hier werden die für alle unten aufgeführten Fälle allgemein geltenden Bedingungen zum Targetwechsel festgehalten. Ergeben sich in einem der Fälle spezielle Anforderungen, sind diese jeweils gesondert aufgeführt.

Es stellt sich die Frage nach dem sinnvollen Zeitpunkt, zu dem das neue, aus einem anderen Verkehrsstrom kommende Target, als solches aktiviert werden kann. Beim Wechseln des Targets auf ein Lfz, das sich noch in einem anderem Verkehrsstrom befindet, müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden.

Zum einen ist durch das Entkoppeln der Regelung auf das direkt vorausfliegende Lfz die Einhaltung eines Mindestabstandes nicht mehr automatisch gewährleistet. Es muss deshalb während der Regelung zusätzlich sichergestellt werden, dass die Radarmindeststaffelung von 5nmi nicht unterschritten wird. Im kritischsten Fall ist zwischen zwei sich auf der gleichen Trajektorie bewegend Lfz nur ein hinzustoßendes Lfz geplant. Der Intrail-Abstand beträgt damit demnach im zulässigen Geschwindigkeitsbereich jedoch mindestens 12nmi, sodass selbst in diesem Fall ausreichend Puffer vorhanden ist.

Zum anderen soll die Art und Weise der Verkehrsführung trotz aller Automatisierung für den die Systeme überwachenden Menschen nachvollziehbar bleiben. Die Herstellung zu vieler Überkreuzbeziehungen in der Regelung, in denen das Verhalten eines Lfz im Verkehrsstrom nicht vom direkt vorausfliegenden abhängt, sondern von einem Lfz in einem der anderen Verkehrsströme, würde dieser Forderung widersprechen. Daher sollte es pro Verkehrsstrom vor jedem Merging Point nur ein Lfz geben, das ein Lfz aus einem andern Verkehrsstrom zum Target hat, sodass sich für einen Merging Point nur insgesamt zwei Überkreuzbeziehungen ergeben.

Betrachtet man beispielhaft die Situation in Abbildung 5.6, so könnte das erste Trai-

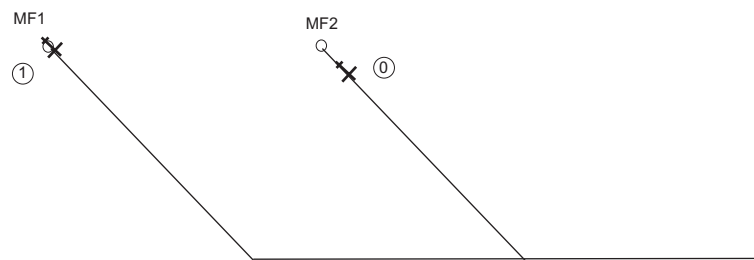


Abbildung 5.6: Frühester Initialisierungszeitpunkt des ersten Trailing (Lfz 1) auf das Leading Aircraft (Lfz 0) am Merging Fix

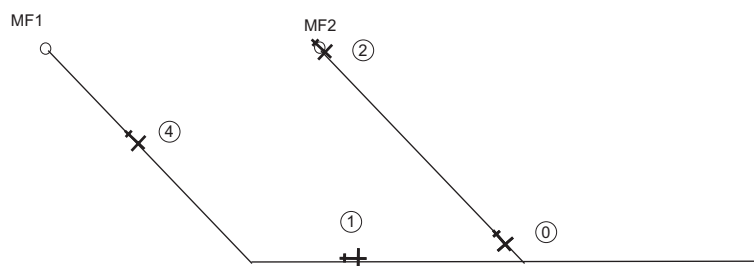


Abbildung 5.7: Frühester Initialisierungszeitpunkt des zweiten Trailing, Lfz 2, auf Target Lfz 1 und Lfz 4 auf Lfz 2 (Lfz 0 und Lfz 1 intrail)

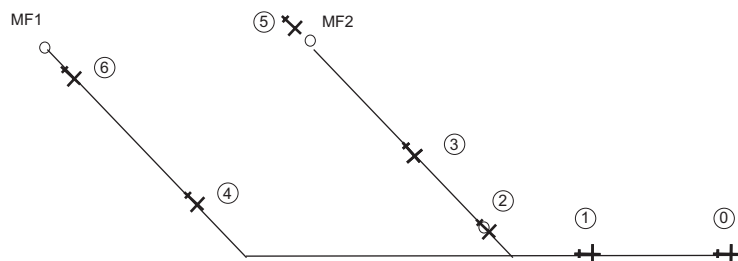


Abbildung 5.8: Eintritt weiterer Lfz

ling Aircraft 1 das Lead Aircraft 0 als Target initialisieren, sobald es am Metering Fix angekommen ist (da es selbst kein vorausfliegendes Target besitzt), womit die erste Überkreuzbeziehung hergestellt ist. Zu einem späteren Zeitpunkt (Abb.5.7) tritt auch das zweite Trailing am Metering Fix ein und dürfte nach der Regel auch das Lfz 1 als Target initialisieren, womit die zweite Überkreuzbeziehung etabliert wäre. Lfz 4 müsste mit der Initiierung von Lfz 2 mindestens warten, bis das Lfz 0 den Merging Point erreicht hat und Lfz 1 und Lfz 0 nun in einer Intrail-Beziehung zueinander stehen.

Diese Tatsache wäre für Lfz 4 aber nur ableitbar, wenn es Überprüfungsrechnungen der Position aller andern in der TMA befindlichen Lfz ausführen würde, wovon hier nicht ausgegangen werden soll.

Die vorige Überkreuzbeziehung aus dem gleichen Verkehrsstrom ist nur dann sicher aufgehoben, wenn das bisherige vorausfliegende Target von Lfz 4 also Lfz 1 den Zusammenführungspunkt erreicht hat.

Da dem jeweiligen Trailing Aircraft keine Information darüber zur Verfügung steht, ob bereits eine weitere solche Überkreuzbeziehung besteht, muss mit dem Targetwechsel immer solange gewartet werden, bis das momentan vorausfliegende Target den Merging Point passiert hat.

Sobald Lfz 3 in der TMA ist (Abb 5.8), wird dieses zum Target für Lfz 4 und Lfz 4 muss erneut wechseln. Das gerade in die TMA eintretende Lfz 5 darf Lfz 4 initialisieren, sobald Lfz 3 den Merging Fix erreicht hat.

Werden Wegpunkte nicht übermittelt, kann der Targetwechsel immer erst stattfinden, wenn sich das Target auf dem letzten Leg vor dem Merging Point befindet.

5.4.2 FALL I

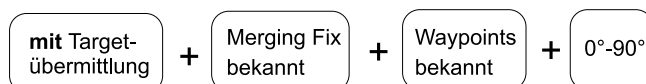


Abbildung 5.9: Randbedingungen Fall I

5.4.2.1 Regelungsverfahren

Um bei bekannten Targets und übermittelten Wegpunkten den zeitlichen Abstand zu bestimmen, berechnet man die Strecken bis zum ersten Punkt, der in den Wegpunktlisten beider Lfz auftritt. Die Umrechnung in eine zeitliche Separation basiert auf den jeweils aktuellen Geschwindigkeiten von Trailing und Target (s. Abschnitt 4.3.4).

Um Fehler zu minimieren ist es erforderlich, die Kurvenradien bei der Berechnung der Strecke zu berücksichtigen. Dazu muss von der Länge der jeweiligen Streckenabschnitts der Schaltabstand s_k subtrahiert und durch die Länge des Kurvensegmentes mit dem Kurvenradius r_k ersetzt werden (s. Abb 5.11). Die Länge des darauffolgenden Streckenabschnitts muss dann ebenfalls um s_k verringert werden. Der Kurvenradius beträgt

$$r_k = \frac{V_k}{\dot{X}_k} \quad (5.1)$$

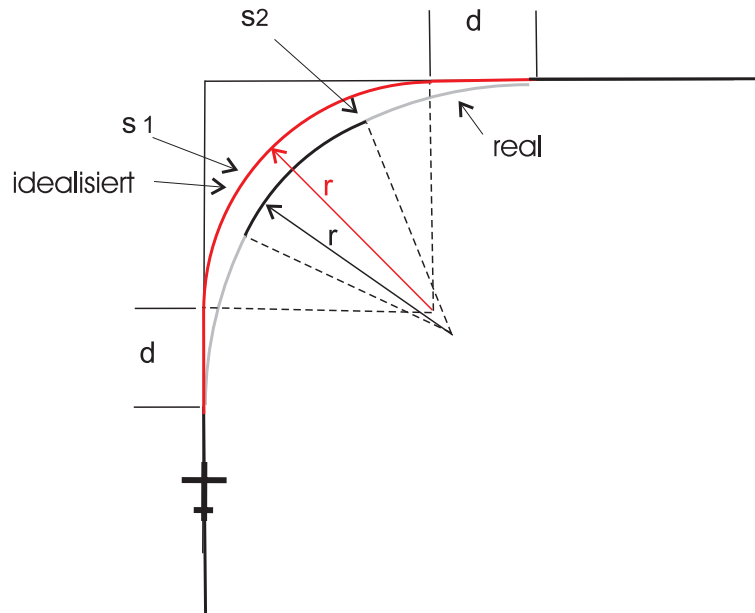


Abbildung 5.10: Zurückgelegte Strecke bei idealisiertem und realem Kurvenflug

wobei sich die Kurvendrehgeschwindigkeit \dot{X}_k aus

$$\dot{X}_k = \frac{g}{V_k} \tan(\Phi) \quad (5.2)$$

berechnet, wobei Φ der Hängewinkel ist.

Bei der Prädiktion wird vereinfachend davon ausgegangen, dass das Ein- und Ausleiten von Kurven plötzlich geschieht und ein Hängewinkel von 25° ohne Übergangsphase hergestellt wird. Hier entsteht ein Fehler in Bezug auf die geflogene Strecke, der bei Kurven mit großen Trackänderungen (max. 90°) größer ausfällt als bei kleinen Kursänderungen und der sich bei hoher Geschwindigkeit am stärksten auswirkt. Daher wurde hier eine Fehlerbetrachtung bei einem 90° Turn vorgenommen, die untersucht, inwieweit sich die geflogenen Strecken in Abbildung 5.10 entlang der idealisierten roten Route von der tatsächlich geflogenen grau-schwarzen Route mit veränderlichem Kurvenradius unterscheiden.

Es müssen die Streckenabschnitte verglichen werden, die zwischen dem Kurveneinleitungspunkt und dem Kurvenausleitungspunkt im realen Fall entstehen. Im idealisierten Fall besteht die Kurve aus einem reinen Kreisbogen. Die Drehrate und damit der geflogene Radius sind nach Formeln 5.2 und 5.1 bei konstantem Hängewinkel nur von der Bahngeschwindigkeit abhängig und sind konstant, wenn diese innerhalb der Kurve ebenfalls konstant ist.

Im idealisierten Fall wird die Kurve erst später eingeleitet, die beiden Geradenabschnitte ($2 \cdot d$) müssen daher zum Kurvensegment hinzuaddiert werden. Es gilt

$$\Delta s = s1 + 2 \cdot d - s2 \quad (5.3)$$

Der ermittelte Fehler Δs beträgt bei einer Geschwindigkeit von 290kts GS lediglich ca. 150m was einem zeitlichen Fehler von ca. einer Sekunde entspricht.

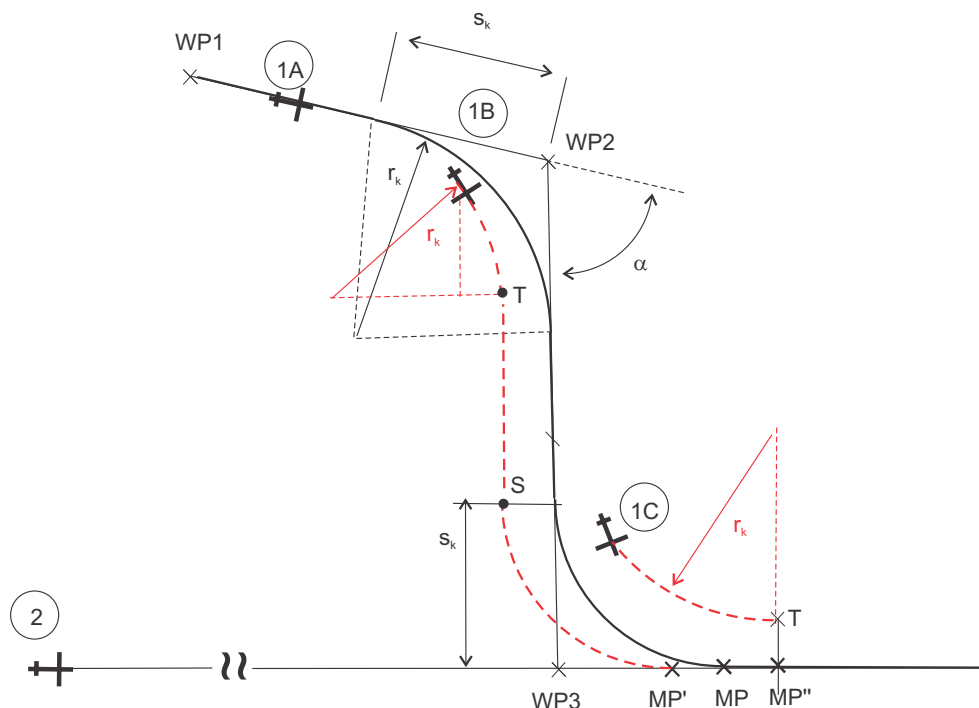


Abbildung 5.11: Trajektorinprädiktion bis zum Merging Point Fall I

Bei 180° Turns wird daher ein Fehler gemacht der nicht mehr als zwei Sekunden beträgt und entsprechend weniger, wenn sich die Geschwindigkeiten bereits an die des Lead Aircraft angepasst haben.

Die beabsichtigte Vereinfachung in Bezug auf idealisiertes Kurvenverhalten bei der Berechnung und Prädiktion zurückgelegter Strecken wird daher vorgenommen.

Der Schaltabstand ist

$$s_k = r_k \cdot \tan\left|\frac{\Delta\alpha}{2}\right| \quad (5.4)$$

Die für die Berechnung benötigte Geschwindigkeit des Target über Grund steht dem Trailing auf jeden Fall zur Verfügung, sodass eine Trajektorienprädiktion des Target problemlos durchgeführt werden kann.

Befindet sich das Target in einer Kurve, kann der momentan geflogene Radius aus der Geschwindigkeit abgeleitet werden.

Die Annahme zu jedem Zeitpunkt besteht nun darin, dass der geflogene Radius so lange beibehalten wird, bis die Trajektorie des Trailing das nächstfolgende Leg oder eine Parallele dazu tangiert. Hat man geographische Länge und Breite dieses Punktes T in Abb. 5.11 mittels Track und Kurvenradius ermittelt, lässt sich auch die Distanz zum nächsten Schaltpunkt berechnen.

Als Referenzpunkt für die Abstandsbestimmung zwischen Trailing und Target (Merging Point) wird dann der Schnittpunkt des letzten Kurvensegmentes mit dem ersten Leg nach dem Merging Point oder wiederum einer Parallelen hierzu verwendet (MP, MP', MP'').

Obwohl das Merging Fix (WP3) erster gemeinsamer Punkt der Trajektorien zur Verfügung steht, ist es nicht sinnvoll diesen als Referenzpunkt zu nutzen, da die induzierten Fehler, bzw. die Sprünge im detektierten Abstand beim Wechsel auf ein Intrail-Verfahren zu groß wären.

5.4.3 FALL II

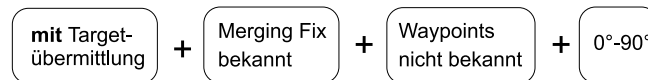


Abbildung 5.12: Randbedingungen Fall II

5.4.3.1 Regelungsverfahren

Da der Track des im MF mündenden Streckenabschnitts, welches Teil der Trajektorie des Target darstellt, aufgrund der fehlenden Wegpunkte nicht genau bekannt ist, kann auch bei der Berechnung des Abstandes zum Merging Point nicht auf den Track des Streckenabschnitts zurückgegriffen werden. Daher berechnet sich der Abstand des Target zum Merging Point hier basierend auf dem tatsächlichen Track des Targets (s. Abb. 5.13).

In Bezug auf die Berechnung der genauen Lage des Merging Points MP (Berücksichtigung der Kurve) soll genauso verfahren werden wie in Fall I. Dies gilt unabhängig davon, ob der Schnittpunkt stromaufwärts oder stromabwärts von dem in der Anflugprozedur veröffentlichten MF liegt.

Existiert kein Schnittpunkt (z.B. bei Target Lfz 0 und Trailing Lfz 1), gilt der Punkt A0 auf gleicher Höhe von L5 als Referenzpunkt, ähnlich wie bei Position 1C in Abb. 5.11 in Fall I.

5.4.3.2 Aktivierung

Da die Wegpunkte fehlen, ist auch der beabsichtigte Track des Target unbekannt. Eine Aktivierung kann erst stattfinden, wenn der aktuelle Track eines Lfz den definierten Merging Point schneidet, bzw. der Schnittpunkt mit der Trajektorie des Trailing (A1) im Umkreis von 2nmi um das Merging Fix zu liegen kommt (Toleranz für Fehler im Track und Cross Track Fehler).

Beim Design der Routenstruktur muss daher vermieden werden, dass ein Lfz als bereits auf dem letzten Leg vor dem Merging Point befindlich identifiziert werden kann, obwohl dies nicht der Fall ist. Das bedeutet, dass Routenabschnitte mit ähnlichen Tracks, die auf den Merging Point zielen (z.B. L1 in Abb. 5.13) vermieden werden müssen.

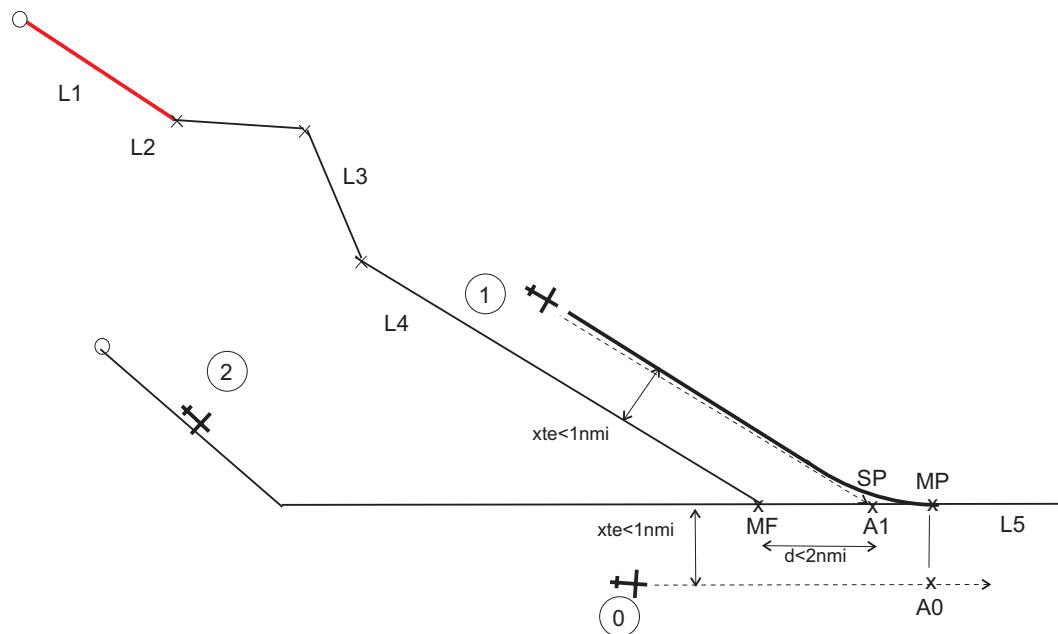


Abbildung 5.13: Bestimmung des Merging Points Fall II

5.4.4 FALL III

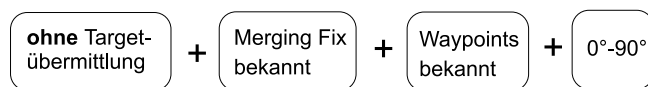


Abbildung 5.14: Randbedingungen Fall III

5.4.4.1 Regelungsverfahren

Ist das Target identifiziert, kann der tatsächliche Merging Point analog zu Fall I (MP in Abb. 5.11) bestimmt werden.

5.4.4.2 Aktivierung

Ist das Target nicht bekannt, werden aber die verbleibenden Wegpunkte aller Lfz über ADS-B verteilt und ist das Merging Fix bekannt, ähnelt das dem Vorgehen dem aus Fall I, jedoch müssen zunächst alle Wegpunktlisten der sich in der TMA befindlichen Lfz auf Existenz des Merging Points, welches das Trailing entlang seiner Trajektorie als nächstes überfliegt, überprüft werden.

Ob sich ein Lfz in der TMA befindet, kann wieder über maximale Distanzen zum ARP in bestimmten Sektoren um den ARP bestimmt werden.

Für diejenigen Lfz, deren Wegpunktliste eine Übereinstimmung mit dem Merging Fix der Trajektorie des Trailing (Lfz 4 in Abb.5.15) aufweist, muss dann die Distanz zu diesem Punkt berechnet werden. Dabei können sich auch mehrere Lfz auf demselben Leg befinden. Bei der Identifikation von Targets kann auf die genaue Berechnung des

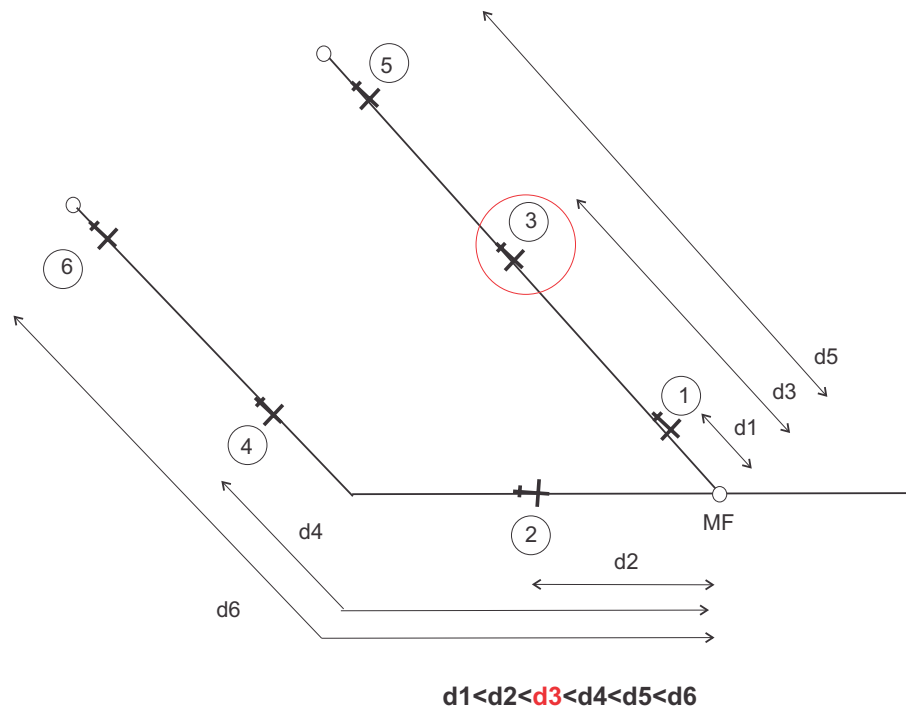


Abbildung 5.15: Identifizierung des Target für Lfz 4 bei unbekannten Targets mit bekannten Wegpunkten (Fall III)

Merging Points (Berücksichtigung des Kurvenelementes) verzichtet werden. Das Lfz, das die größte Entfernung zum Merging Fix aufweist, die jedoch noch geringer ist als die Distanz des Trailing zu diesem Merging Fix, wird als Target identifiziert (s. Abb 5.15). Dieses soll als indirekt vorausfliegendes Lfz bezeichnet werden.

Wie auch in Abschnitt 5.3 gelten für die Identifizierung des für die Regelung relevanten zeitlichen Sollabstandes die Rastergrenzen ($n \cdot 6,6 \text{ nmi} \pm 3,2 \text{ nmi} \rightarrow n \cdot 90 \text{ s}$). Auf diese Art und Weise werden auch Lfz bestimmt, die über das selbe Metering Fix anfliegen, also auch Targets, die sich bereits auf der Trajektorie des Trailing befinden (Bestimmung über Cross Track Error). Liegt dieser Fall vor soll die für die Intrail-Phase definierte Vorgehensweise angewendet werden.

vom Merging Fix entfernt ist. Eine Initiierung in größerer Entfernung zum Merging Fix ist nur bei entsprechend geringerer Geschwindigkeit möglich. Da aus den Überlegungen zur Intrail-Phase bereits eine maximale Initiierungsgeschwindigkeit von 280kts resultiert, soll diese auch hier angesetzt werden.

5.4.5 FALL IV

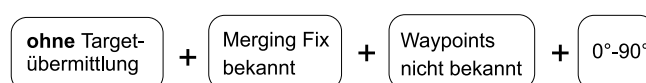


Abbildung 5.16: Randbedingungen Fall IV

5.4.5.1 Regelungsverfahren

Die Abstandsbestimmung erfolgt analog Fall II.

5.4.5.2 Aktivierung

Sind weder die Targets noch die Wegpunkte bekannt, müssen alle in der TMA befindlichen Lfz auf einen Schnittpunkt ihres momentanen Tracks mit dem nächstgelegenen Merging Fix der Trajektorie des Trailing hin überprüft werden (Umkreis 2nmi). Dieser Schnittpunkt muss für einen Zeitraum von mehreren Sekunden annähernd konstant sein (Grund hierfür s. Fall VIII). Das dem Trailing nach der Abstandsbestimmung indirekt vorausfliegende Lfz wird als Target aktiviert.

Die Randbedingungen zum Targetwechsel aus Fall III bleiben erhalten.

Bezüglich der Routengeometrie gilt auch hier die gleiche Einschränkung wie in Fall II. Keines der Routensegmente aus anderen Anflugrichtungen, die nicht am betreffenden Merging Fix zusammenfließen, sollte auf den Merging Fix zeigen (2nmi Toleranz), um Fehlidentifikationen zu vermeiden.

5.4.6 FALL V

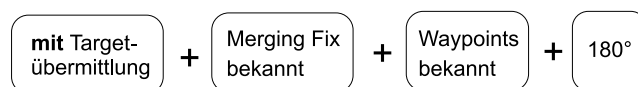


Abbildung 5.17: Randbedingungen Fall V

5.4.6.1 Regelungsverfahren

Es soll nun untersucht werden, wie im Fall einer 180°-Turn Merging-Geometrie vorgegangen werden kann.

Fall V betrachtet die Situation, dass das Target und dessen Wegpunkte sowie das in der Anflugprozedur veröffentlichte Merging Fix (WP3 in Abb. 5.18) bekannt sind.

Ist das auf das Leg (L3) hinzustoßende Lfz das Trailing Aircraft, besteht in der Abstandsbestimmung zum Merging Point kein Unterschied zu Fall I, da das Trailing seine Ankunftszeit entlang des 180° Turns genau berechnen kann.

Das Herstellen des korrekten Abstandes soll möglichst durch Ausnutzen der Trombone (Verkürzen oder Verlängern) und nicht durch Geschwindigkeitsänderungen erfolgen.

Stellt das hinzustoßende Lfz das Target dar, muss das Trailing den Ankunftszeitpunkt am Merging Fix auf Basis der momentanen Geschwindigkeit des Target entlang der Wegpunkte prädiizieren. Da das bloße Aufaddieren der Leg-Längen zu ungenau ist, soll wie schon in Fall I eine bessere Näherung für die voraussichtlich vom Target zurückgelegte Strecke betrachtet werden. Es ist zunächst davon auszugehen, dass die Trajektorie

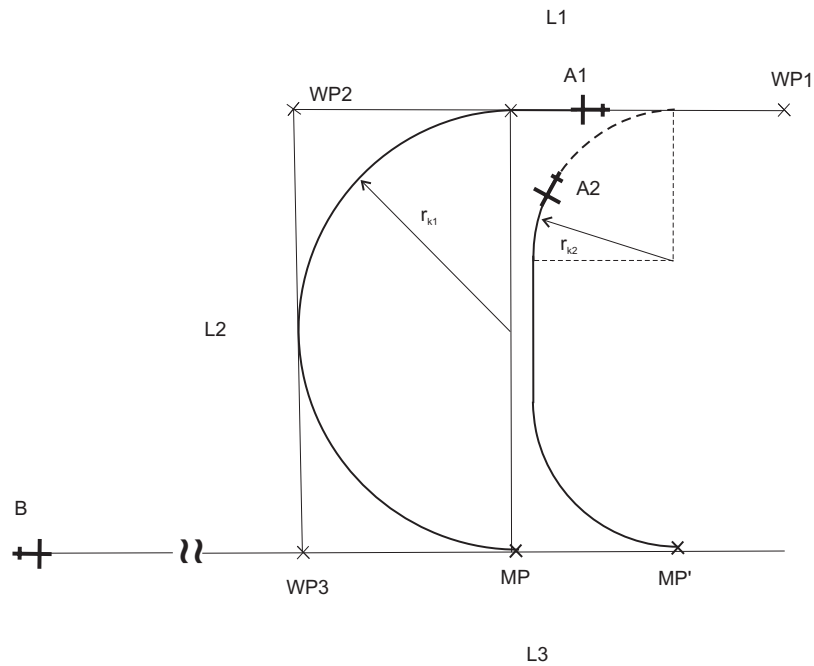


Abbildung 5.18: Bestimmung des Merging Points in Fall V

des Target seine Wegpunkte im fly-by Modus einhält und sich das Lfz in den Kurvenabschnitten auf einem Kreisbogen mit dem in Gleichung 5.1 gegebenen Kurvenradius bewegt.

Fliegt das Target mit einer geringeren als der in der Anflugprozedur angegebenen Geschwindigkeit, soll diese für die Berechnung des Kurvenradius herangezogen werden (z.B. Kurvensegment bei A2).

Ist die aktuelle Geschwindigkeit größer, soll unabhängig von der momentanen Geschwindigkeit des Target für die Berechnung des Kreisbogens die maximal zulässige in der Anflugprozedur veröffentlichte Geschwindigkeit angenommen werden (maximaler Radius ist r_{k1} lt. Abb. 5.18). Es ist davon auszugehen, dass das Target seine Geschwindigkeit bis zum Einleiten der Kurve auf die in der Anflugprozedur maximal zulässige Geschwindigkeit reduziert hat. Diese Geschwindigkeit basiert auf der Entfernung der entgegengerichteten Legs (L1, L3), was den maximalen Radius bestimmt, mit dem ein Überschießen vermieden wird.

Hat das Target die Kurve bereits eingeleitet (Position A2), soll nicht davon ausgegangen werden, dass die durch die Wegpunkte festgelegte Trajektorie wieder erfolgen wird, sondern dass das Target bis zum Einleiten der nächsten Kurve ein zum Leg L2 parallelen Kurs beibehält. Der tatsächliche Kurvenradius des Target wird nicht ermittelt, sondern nur aus der momentanen Geschwindigkeit des Target unter der Annahme eines konstanten Hängewinkels von 25° nach Gl. 5.2 und 5.1 abgeleitet (r_{k2}).

Da die Trajektorienprädiktion auf Basis von fly-by und nicht fly-over in Bezug auf den Merging Point erfolgt, muss definiert werden welcher der tatsächliche Merging Point ist, der als Referenzpunkt für eine Regelung herangezogen werden soll. Hierfür gilt das gleiche wie in Fall I beschrieben.

5.4.7 FALL VI

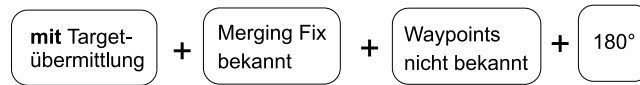


Abbildung 5.19: Randbedingungen Fall VI

5.4.7.1 Regelungsverfahren

Die Berechnung des Abstandes des Target zum Merging Fix erfolgt hier analog Fall II.

Da die Wegpunkte des Target nicht zur Verfügung stehen, wird, um die Trajektorienprädiktion bei eindrehenden Targets durchführen zu können, angenommen, dass die Trajektorie des Targets eine durch den Merging Fix gelegte Orthogonale tangiert. Leitet das Target den Turn jedoch früher ein, müssen die Berechnung und der Merging Point angepasst werden und es gilt gleiches wie im Fall V.

5.4.7.2 Aktivierung

Führt das Target den 180° Turn aus, kann ein Targetwechsel initiiert werden, sobald sich das Target auf dem zum Leg nach dem Merging Fix um 180° gegenläufigen Track befindet, was leicht überprüft werden kann.

5.4.8 FALL VII

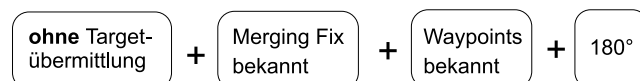


Abbildung 5.20: Randbedingungen Fall VII

5.4.8.1 Regelungsverfahren

Die Abstandsbestimmung erfolgt analog Fall V.

5.4.8.2 Aktivierung

Ist das Target nicht bekannt, werden aber die Wegpunkte via ADS-B übertragen und ist das Merging Fix festgelegt, kann zur Bestimmung von Target und Sollabstand vorgegangen wie im Fall III.

Das Lfz das den größten Abstand zum Merging Fix aufweist, der kleiner ist als der Abstand des Trailing zum Merging Fix, ist als das Target anzusehen. Es kommen alle Lfz als Target in Frage, deren Trajektorie ein Leg besitzen, das im Merging Fix mündet.

5.4.9 FALL VIII



Abbildung 5.21: Randbedingungen Fall VIII

5.4.9.1 Regelungsverfahren

Leitet ein zuvor als mögliches Target identifiziertes Lfz einen Turn ein (sich nähernder Schnittpunkt mit Merging Fix) erfolgt eine Prädiktion der Trajektorie des Target bis zum Leg nach dem Merging Fix analog zu Fall VI.

5.4.9.2 Aktivierung

Sind Targets und Wegpunkte unbekannt, kann nach in Fall IV angewandter Regel ein Target erst identifiziert und ein Targetwechsel eingeleitet werden, wenn der Track des jeweiligen Lfz das Merging Fix schneidet. Dies tritt bei 180° Turns des Targets jedoch im Gegensatz zum Merging unter 0°-90° nur zeitweise auf, wenn das potenzielle Target den 180° Turn ausführt, da der Schnittpunkt auf der Trajektorie des Trailing ab Einleitung des Turns stromabwärts wandert (s. Abb. 5.21).

Der Abstand des Schnittpunktes zum Merging Fix wird in jedem Fall aber nur kurzzeitig im zuvor definierten Toleranzbereich (hier 2nmi) liegen. Zudem ist ein Merging zwischen >90° und <180° ausgeschlossen. Das heißt, eine gültige Targetidentifizierung ist erst möglich, wenn das Target den Scheitelpunkt seiner Kurve erreicht hat. Dreht das Target früher ein (Positionen 1B und 1B') wird ein Schnittpunkt mit Toleranz von 2nmi um das MF nach passieren des Scheitelpunktes nie erreicht.

Aus diesem Grund muss mit unter 180° hinstoßenden Lfz anders verfahren werden.

Bei den hier vorliegenden Rahmenbedingungen müssen alle in der TMA befindlichen Lfz zunächst auf ihr Potenzial hin untersucht werden, ein Kandidat für ein unter 180° hinstoßendes Target zu sein. Dies trifft zu, falls der momentane Track des möglichen Targets, dem Track des Streckenabschnitts, welches auf den Merging Fix folgt um 180° entgegengerichtet ist ($\pm 5^\circ$ Toleranz). Zusätzlich darf die Cross Track Distanz jedes möglichen Targets zu diesem Leg nicht mehr betragen, als die größte übliche Distanz zwischen zwei Legs eines 180° Turns. Die potenziellen Targets müssen identifiziert sein, bevor eines von ihnen den Turn einleitet, da in der folgenden Phase bis zum Scheitelpunkt nur ungültige Schnittwinkel entstehen. Das Target wird dann endgültig durch das Fehlen in der zuvor erstellten Liste potenzieller Targets und einer Überprüfung der Kurveneinleitung identifiziert.

Führt das Trailing den Turn aus, gilt zur Targetidentifizierung wieder Fall III.

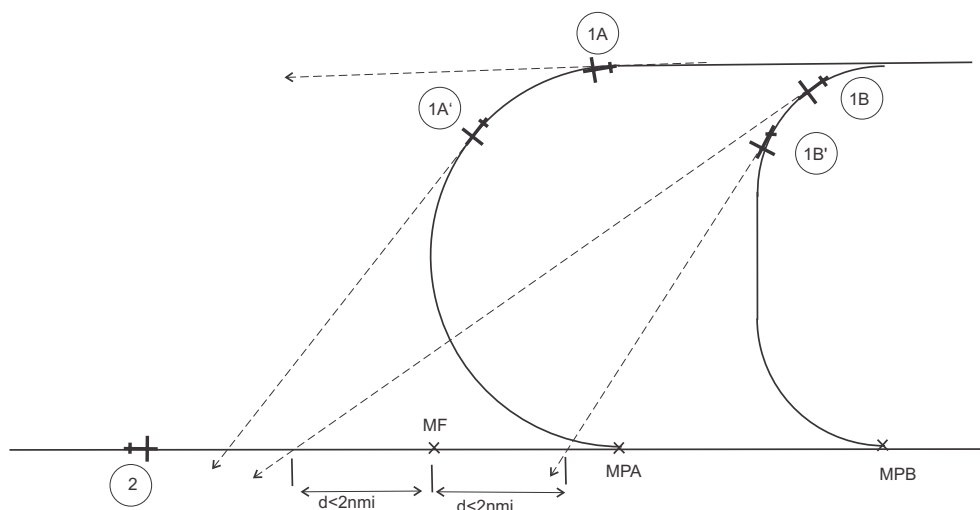


Abbildung 5.22: Targetidentifizierung in Fall VIII

5.4.10 FALL IX



Abbildung 5.23: Randbedingungen Fall IX

5.4.10.1 Trackfächer

In den übrigen in Tabelle 5.1 aufgeführten Fällen wird davon ausgegangen, dass keine dedizierten in den Anflugprozeduren veröffentlichten Merging Points existieren. Die Überlegungen bezüglich dieser Randbedingung geschehen vor dem Hintergrund, die Merging-Verfahren flexibler gestaltbar zu machen. Sind die Merging Points nicht fester Teil der Prozedur, können die geflogenen Tracks der einzelnen Lfz lateral variiert werden, um so z.B. lärmmindernde Maßnahmen umzusetzen oder auf unterschiedliche Verkehrsdichten reagieren zu können (s. Abb. 5.24).

Ein Arrival Manager muss jedoch immer von einer bestimmten Lage des Merging Points ausgehen, um eine entsprechenden Sequenz und damit erforderliche Ankunftszeiten an den Einflughpunkten berechnen zu können. Für die internen Berechnungen des AMAN ist die Lage der Merging Points entlang einer Merging-Achse in bestimmten Grenzen verschiebbar. Es wird dann mit anderen Trajektorien gerechnet, als sie in der Standardanflugprozedur (STD-Leg in Abb. 5.24) veröffentlicht sind. Die Lfz, die mit den Wegpunkten der veröffentlichten Prozedur rechnen, stellen bei der Verwendung von ASAS dann bei Identifizierung des Targets fest, dass der Sollabstand entlang der ursprünglichen Trajektorie nur mit Reduzierung der Geschwindigkeit herzustellen wäre.

Es soll hier die Regel gelten, dass zunächst nur eine Anpassung der Geschwindigkeit auf die Referenzgeschwindigkeit der Anflugprozedur und daraufhin eine Veränderung des Tracks innerhalb der festgelegten zulässigen Grenzen vorgenommen wird, wodurch

sich der Schnittpunkt beider Trajektorien und damit der Merging Point verschiebt. Erst danach darf ggf. eine weitere Geschwindigkeitsrücknahme erfolgen. Der Punkt ab dem die Veränderung des Tracks erlaubt ist, kann in der Anflugprozedur festgeschrieben werden. Er soll als Trajectory Change Point (TCP) bezeichnet werden (Kurveneinleitung ab Punkt P). Der tatsächliche Merging Point mit dem Target muss somit zunächst von jedem Trailing Aircraft selbst identifiziert werden, um für eine ASAS-Regelung herangezogen werden zu können.

Dieses Verfahren stellt kein „Heading-then-Merge“ im klassischen Sinne dar, da dabei die Lfz nur einen Umweg fliegen, um danach wieder auf ihre ursprüngliche Trajektorie zurückzukehren. Hier wird dagegen die Trajektorie an sich modifiziert.

Wählt man den Ansatz des flexiblen Tracks, ist es jedoch nicht möglich beim ASAS-Manöver auf vom Target Aircraft übermittelte Wegpunkte zurückzugreifen, wenn sich der Track eines jeden Lfz an das Verhalten seines Targets anpasst.

5.4.10.2 Regelungsverfahren

Vor dem Fächer wird für ein über den TCP anfliegenderes Trailing zunächst der Schnittpunkt des Target mit der Standardtrajektorie bestimmt. Basierend auf dem so identifizierten und vom AMAN beabsichtigten Fehler schlägt das Trailing einen anderen als den definierten Standard-Track ein (Geschwindigkeitsanpassung vor Trackänderung). Ab diesem Zeitpunkt gilt der neue Schnittpunkt mit der Trajektorie des Target als Referenz.

Fliegt das Trailing nicht über den TCP an, steht der für das PP zu verwendende Schnittpunkt von vornherein fest, da erst auf das neue Target gewechselt werden darf, wenn es den Fächer-Track bereits eingeschlagen hat.

Da sich das Target bei Initialisierung immer bereits auf dem Leg befindet, durch das der Schnittpunkt bestimmt wird (s.u. Aktivierung), ist die Abstandsberechnung hier analog zu Fall II durchzuführen. Befindet sich das Target beim Initialisieren jenseits des Merging Points gilt Abschnitt 5.3.

5.4.10.3 Aktivierung

Arbeitet man ohne publizierte Merg und ist das Target bekannt, kann bei 0° - 90° Winkeln eine Initiierung des ASAS-Manövers frühestens stattfinden, wenn der Track des Targets die Trajektorie des Trailing kreuzt. Der Schnittpunkt der beiden Tracks ist dann der Punkt, der als Referenzpunkt für die Regelung herangezogen wird (ähnlich Fall II).

Da die Situation auftreten kann, dass kein Schnittpunkt existiert, muss für die Bestimmung eines Schnittpunktes jedes Leg des Trailing um einen bestimmten Betrag verlängert werden (s. L1 in Abb 5.25). Der so erhaltene Schnittpunkt (SP) gilt nun als Referenzpunkt des Target. Der Referenzpunkt des Trailing (RP) ergibt sich durch Projektion des Schnittpunktes auf die Trajektorie des Trailing. Allerdings ist nicht gewährleistet, dass sich das Target bereits auf dem letzten Leg vor dem Merging Point befindet. Hieraus ergeben sich Einschränkungen für den Wechsel auf ein Target aus dem anderen Verkehrsstrom.

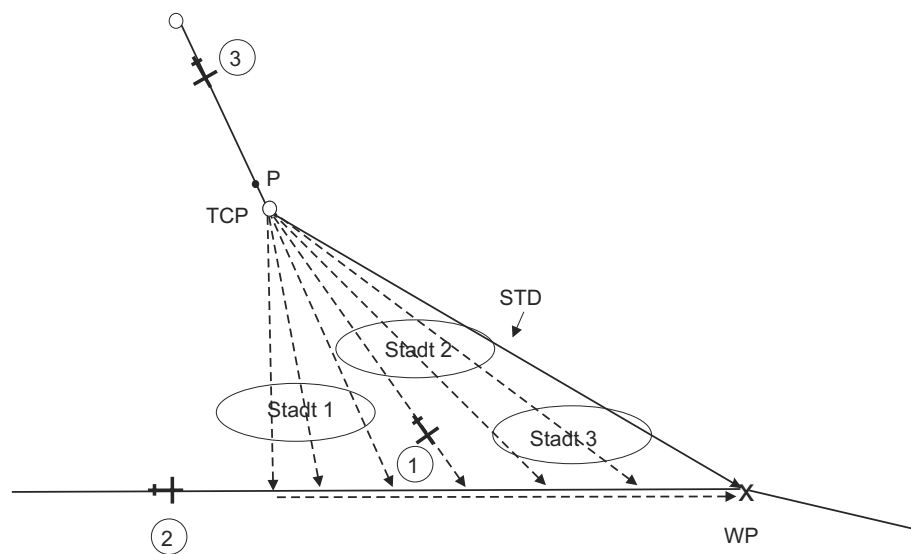
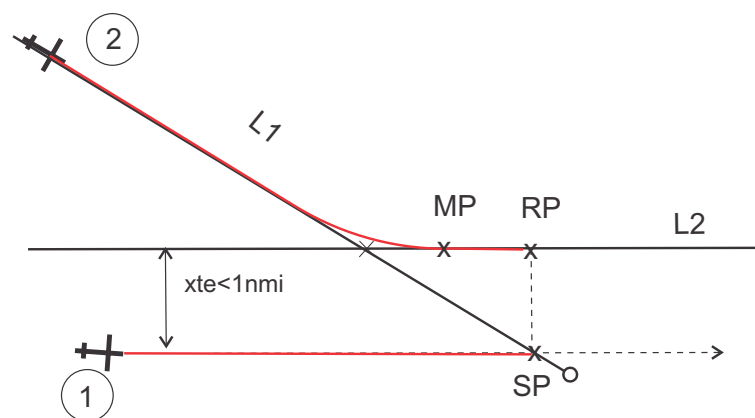


Abbildung 5.24: Merging-Geometrie mit Fächer

Abbildung 5.25: Identifizierung des Merging Points s mittels verlängerter Legs

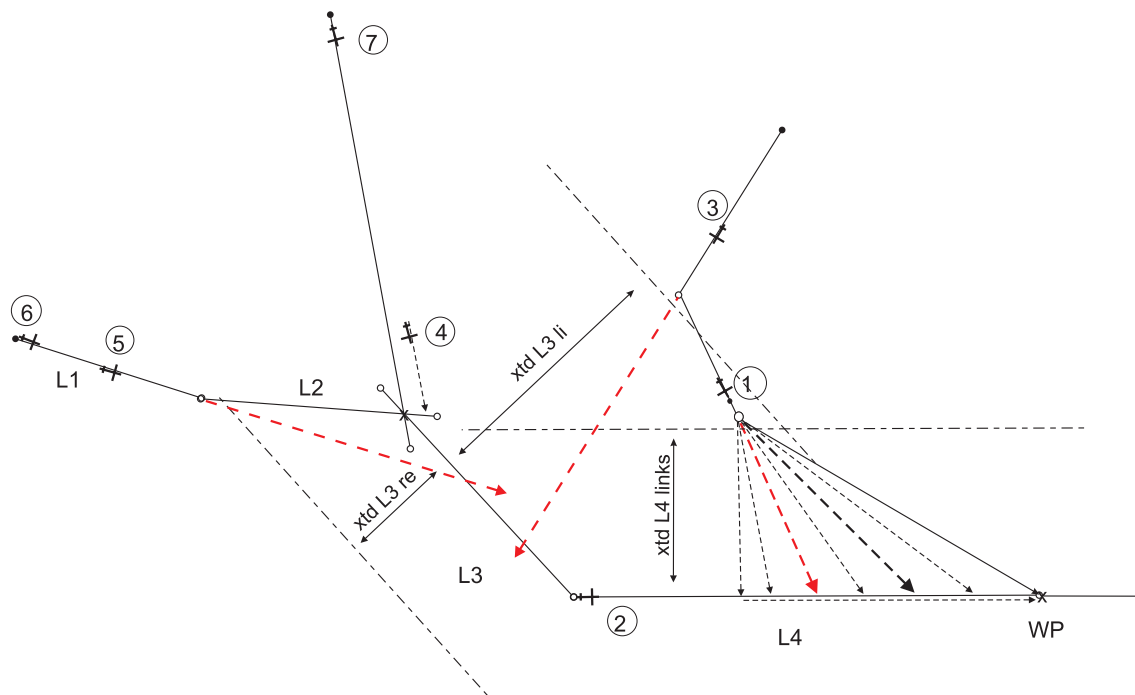


Abbildung 5.26: Mögliche Fehlidentifikation von Merging Points

Weist die Trajektorie des Target einen TCP auf, steht erst bei Passieren dieses Punktes fest, welchen Track das Target einschlagen wird. Daher darf es auch frühestens ab diesem Zeitpunkt als Target dienen. Da das Trailing über die Existenz eines TCP in der Trajektorie des Target aber nicht informiert ist, muss für jedes Trailing eine allgemeingültige Bedingung definiert sein, ab dem das Target gewechselt werden darf. Diese Bedingung lässt sich durch die Unterschreitung einer links- oder rechtsseitigen Cross Track Distanz des Target zur Trajektorie des Trailing ausdrücken. In Abbildung 5.26 gilt daher die Cross Track Distanz „xtd L4 links“, welche unterschritten werden muss, bevor Lfz 2 das Lfz 1 als Target initiieren darf. Der TCP liegt dann außerhalb.

Ist das über den TCP anfliegende Lfz das Trailing, muss gefordert werden, dass sich das Target bereits auf dem sog. Merging-Leg (L4) befindet, da am TCP sonst keine Entscheidung über den zu fliegenden Track getroffen werden kann. Das bedeutet für die Geometrie, dass der Abschnitt des Legs L4 vor dem frühestmöglichen Schnittpunkt der beiden Trajektorien mindestens xtd_{L4} abzüglich Standardsollabstand betragen muss.

Obige Überlegungen müssen auch auf alle weiteren Legs übertragen werden. Um die Berechnung falscher Schnittpunkte generell zu vermeiden soll gelten, dass jedem Leg der Anflugtrajektorie eine Bedingung bezüglich der erforderlichen maximalen Cross Track Distanz zugeordnet ist, die das Target vor der Aktivierung unterschritten haben muss. Je nach Geometrie ist es erforderlich, zwischen linksseitiger und rechtsseitiger Cross Track Distanz zu unterscheiden, wie das Beispiel in Abb. 5.26 zeigt. Gälten die Einschränkungen nicht, würde Lfz 7 für sein Target Lfz 6 zunächst einen falschen Merging Point berechnen und Lfz 5 könnte Lfz 3 fälschlicherweise als Target ansehen.

Konnte ein Trailing bei Erreichen des TCP noch kein neues Target identifizieren, soll der Track des bisherigen Target (Intrail) übernommen werden.

Dient die flexible Gestaltung von Anflugrouten nicht nur dazu auf unterschiedliche Ver-

kehrsdichten zu reagieren, sondern auch dazu, definierte Lärmkontingente über bestimmten geographischen Zonen nicht zu überschreiten, müssen Randbedingungen identifiziert werden, mit welchen vermieden wird, dass der im Fächer geflogene Track zu stark vom beabsichtigten Track abweicht. Dies hängt davon ab, wie stark Geschwindigkeit und Position von der in den Berechnungen des AMAN benutzten Referenztrajektorie abweichen. Bei der Durchführung einer Fächer-Zusammenführung wird vom Trailing eine erforderliche Trackänderung detektiert, wenn Target und Trailing pünktlich sind und sich in diesem Bereich mit der vorgesehenen Referenzgeschwindigkeit fortbewegen. Pünktlich bedeutet hier ein möglichst geringer Fehler im Sinne eines CTD (Ankunft an einem Ort x Sekunden nach dem Target).

Das Trailing detektiert, dass es bei Verfolgen der Standardtrajektorie das vorgeschriebene Spacing unterschreitet und passt den Track zu einer Wegverlängerung an.

Wenn Trailing und/oder Target noch Fehler in der Separation zum bisherigen Target und damit Abweichungen von der internen Rechnung des AMAN aufweisen, kann dies in der Folge zu Abweichungen vom geplanten Track führen.

Die Randbedingungen für zeitliche Toleranzen am Switchingpunkt bzw. am Trackentscheidungspunkt (TCP) setzen sich hier aus zwei Überlegungen zusammen.

Es soll hierzu die Routengeometrie in Abbildung 5.27 betrachtet werden bei der der Track über einen Bereich von 53° (α_{max} S1) variiert werden kann. Der maximal erlaubte Track soll in der Anflugprozedur festgeschrieben sein.

Stellt Lfz 2 das Trailing Aircraft dar und erreicht dieses den TCP zu spät, ist, wenn vom AMAN der maximale Track geplant wurde, der entlang des Standardtracks berechnete Abstand bei typischen Geschwindigkeiten ggf. trotzdem zu gering. Der vom AMAN beabsichtigte Track (im Beispiel der maximale Track) wird jedoch ebenfalls nicht als zu fliegender Track identifiziert, da der so berechnete zeitliche Abstand zum Target, entlang dieser Trajektorie wegen des bestehenden Fehlers wiederum zu groß wäre. Somit wird ein Track gewählt, mit welchem bei der momentanen Geschwindigkeit der Abstand zum Target genau hergestellt werden kann. Der ursprünglich vom AMAN beabsichtigte Track würde nur resultieren, wenn das Trailing Aircraft gleichzeitig zu seiner Verspätung schneller wäre als die Referenzgeschwindigkeit des AMAN. Es kommt demnach nicht allein auf das Verhalten des Trailing Aircraft an, sondern es spielt zusätzlich eine Rolle, ob das Target Aircraft den TCP zu früh oder zu spät erreicht. Ist das Target zusätzlich zu früh oder zu schnell wird der tatsächliche Track noch weiter von dem durch den AMAN vorgesehenen Track abweichen.

Die zweite Überlegung in Bezug auf die Randbedingungen resultiert aus dem umgekehrten Fall. Ist das Trailing Lfz 2 zu früh und oder zu schnell und das Target Lfz 1 zu spät und oder zu langsam, kann es ebenfalls zu Abweichungen im Track kommen, wenn der AMAN-Track nicht bereits dem Track mit der maximalen Wegstrecke entspricht. In diesem Fall muss die Geschwindigkeit des Trailing noch weiter verringert werden.

Soll entlang der Strecke bis zum Merging Point der gesamte Fehler kompensiert werden, ergibt sich für Geschwindigkeits- und Zeittoleranzen die Randbedingung daraus, dass die Minimum Clean Speed der Lfz nicht unterschritten werden darf. Im Normalfall sind dies 180kts IAS bzw. in diesem Bereich der TMA ca. 215kts GS ohne Wind.

Abbildung 5.28 zeigt die Abweichungen von geplantem Track und die sich ergebenden Geschwindigkeiten für den Fall, dass vom AMAN der maximal mögliche Track geplant

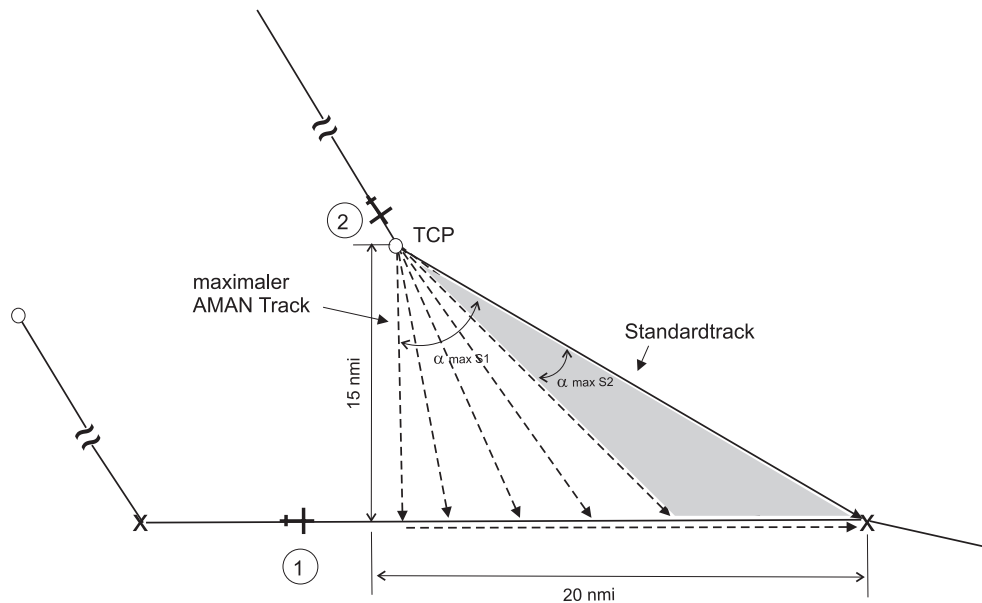


Abbildung 5.27: Maximaler Winkelbereich des Trackfächers Im Fall mit (S1) und ohne Übermittlung von Targets (S2)

wurde, für einen Sollabstand von 90 Sekunden. Bei größeren Sollabständen, sind die Abweichungen geringer. Abbildung 5.29 zeigt die gleichen Parameter für den Fall, dass der vom AMAN geplante Track der Standardtrajektorie entspricht. Die Referenzgeschwindigkeit beträgt 265kts GS.

Soll am TCP ein Geschwindigkeitsbereich von 260kts bis 270kts GS zugelassen sein, betragen die Abweichungen vom geplanten Track bei Unpünktlichkeiten von Target oder Trailing von nur 5 Sekunden bereits bis zu 7° (grau gestrichelte Linie in Abb. 5.29 und Appendix D). Dies geschieht jedoch nur, wenn das Target zu spät, der Abstand also kleiner ist, als es in der Planung vom AMAN vorgesehen war und die Geschwindigkeit des Trailing höher wäre, als die des Target. In Situationen in denen das Trailing schneller ist als das Target und eine erforderliche Wegverlängerung berechnet wird, muss zunächst immer von einer Verringerung der Geschwindigkeit des Trailing auf die Referenzgeschwindigkeit des AMAN (265kts) ausgegangen werden und nur der verbleibende Fehler durch eine Änderung des Tracks kompensiert werden. Eine Anpassung auf die Geschwindigkeit des Target würde ebenfalls wieder zu einem abweichenden Fächertrack führen. Im umgekehrten Fall, wenn das Trailing langsamer ist als das Target, dieses aber zu früh, der Abstand also größer als vom AMAN vorgesehen, wird das Trailing mit einer geringeren Wegverlängerung reagieren, als es vom AMAN vorgesehen war. Die Abweichung vom beabsichtigten Winkel kann verringert werden, indem auch hier die Geschwindigkeit des Trailing zunächst an die Referenzgeschwindigkeit des AMAN angepasst wird.

Mit dieser Maßnahme kann erreicht werden, dass bei einer zugelassenen relativen Unpünktlichkeit von 5 Sekunden im Geschwindigkeitsbereich zwischen 260 und 270 Knoten Winkelabweichungen von maximal $4,5^\circ$ auftreten. Dies soll als zulässiger Maximalwert für die folgenden Simulationen gelten.

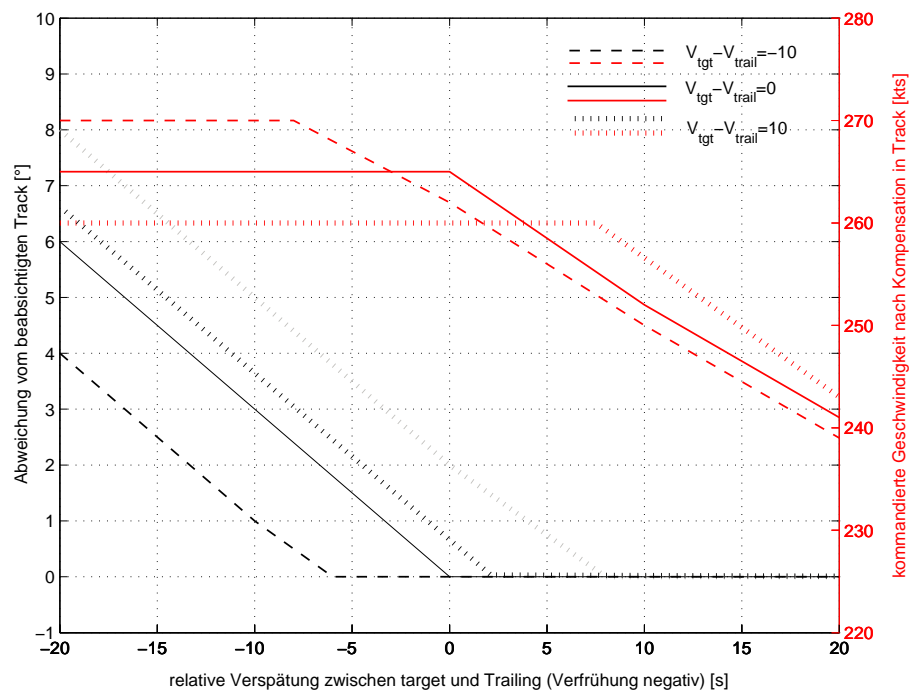


Abbildung 5.28: Abweichungen vom beabsichtigten Track und kommandierte Geschwindigkeiten wenn AMAN Track maximal

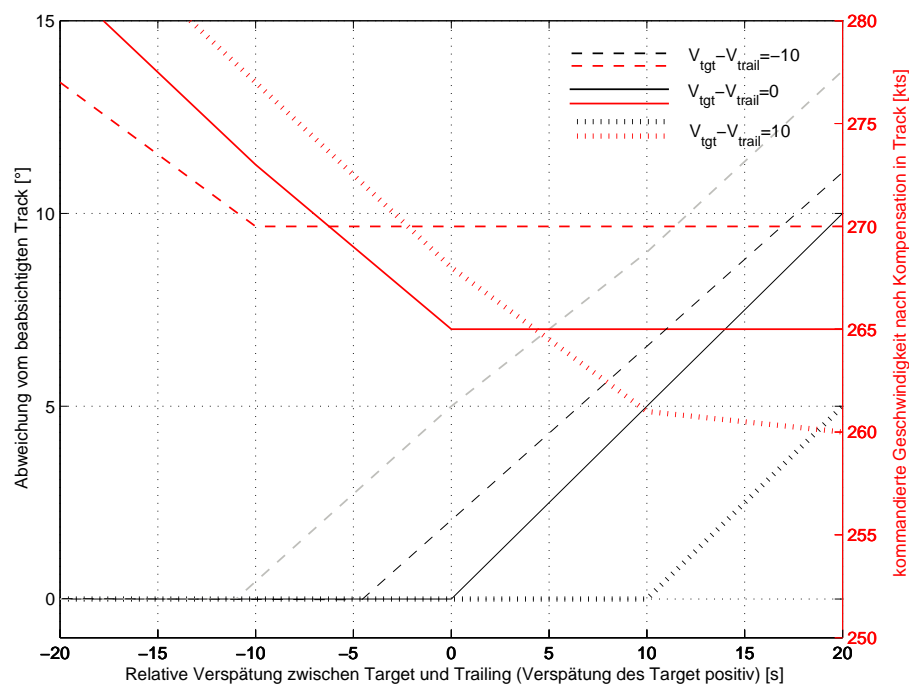


Abbildung 5.29: Abweichungen vom beabsichtigten Track und kommandierte Geschwindigkeiten bei Sollabstand 90s wenn AMAN Track und Standardtrack identisch

5.4.11 Fall X

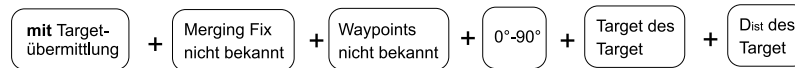


Abbildung 5.30: Randbedingungen Fall X

5.4.11.1 Regelungsverfahren

Eine völlig andere Art der Abstandsbestimmung beim Merging ohne Bezug zu einem fixen Punkt kann angewendet werden, wenn die ADS-B Informationen des Target das Callsign von dessen Target und dem momentanen Abstand zu diesem enthält. Die Targets, welchen ein Trailing entlang seiner Trajektorie in der TMA zu folgen hat, müssen dabei bekannt sein (individualisierte Targetliste). Für die Regelung wird der Abstand des Trailing zum zukünftigen Target Aircraft benötigt. Da hier kein fester Bezugspunkt besteht muss die Information rein relativ aus den Abständen der anderen Lfz untereinander abgeleitet werden. Im Fall rein relativer Führung ohne festen Merging Point, muss zur Bestimmung des Abstandes zum Target die Bedingung erfüllt sein, dass das Trailing und das neue zu aktivierende Target beide dem selben Target folgen. Alle Lfz verbreiten die Information über die Distanz zu ihrem Target via ADS-B. Die Distanz zum neuen Target kann dann durch einfache Differenzbildung ermittelt werden.

5.4.11.2 Aktivierung

Betrachtet man die Situation in Abb 5.31 darf das erste Trailing (Lfz 1) das Lead Aircraft (Lfz 0) erst als Target initialisieren, wenn das Lead die Trajektorie des Trailing erreicht hat (bzw. sich bis auf eine Cross Track Error Toleranz genähert hat).

Da Lfz 2 und Lfz 1 ab diesem Moment dasselbe Target haben, kann Lfz 2 den Abstand auf Lfz 1 jetzt aus den ADS-B Informationen von Lfz 1 berechnen, An dieser Stelle wird die erste Überkreuzbeziehung generiert

Die Initialisierung von Lfz 1 auf Lfz 0 erfolgt damit später als im Fall, in dem bei der Abstandsbestimmung mit dem Schnittpunkt der Trajektorien gearbeitet wird. Da Lfz 2 jetzt bereits Lfz 1 zum Target hat und den Abstand auf Lfz 1 mit seiner ADS-B Nachricht aussendet, kann Lfz 4 in diesem Moment auch das Lfz 2 als Target initialisieren, was die zweite Überkreuzbeziehung darstellt.

Sobald Lfz 3 in die TMA eintritt (Abb. 5.32), erfolgt der Wechsel von Lfz 2 auf Lfz 3 (keine Änderung der Anzahl Überkreuzbeziehungen). Richtet man sich im Beispiel nach der Anzahl maximaler Überkreuzbeziehungen darf Lfz 5 das Lfz 4 bei Eintritt in die TMA initialisieren (s. Abb. 5.33), da die vorherige Überkreuzbeziehung aufgelöst ist.

Ebenso dürfte Lfz 6 erst dann Lfz 5 initialisieren, wenn das bisherige Target von Lfz 4 (Lfz 3) auf der Trajektorie von Lfz 4 liegt (intrail). Allerdings haben die Lfz keine Information darüber, wie viele Überkreuzbeziehungen im Verkehrsstrom vor Ihnen bereits bestehen. Das bedeutet, dass auch hier auf ein Lfz aus dem anderen Verkehrsstrom frühestens gewechselt werden kann, wenn das jeweilige Intrail-Target bereits auf der Trajektorie eines Lfz aus dem anderen Verkehrsstrom liegt (z.B Lfz 4 und Lfz 1 in Abb. 5.32).

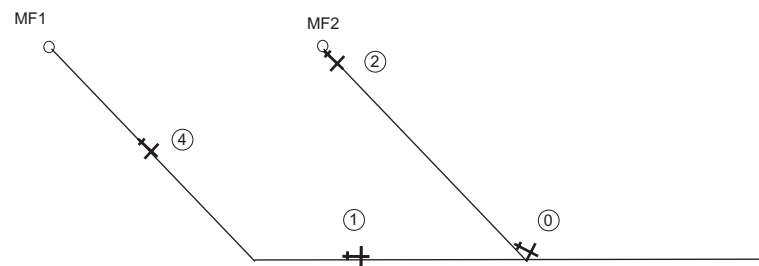


Abbildung 5.31: Fall X, Initialisierung

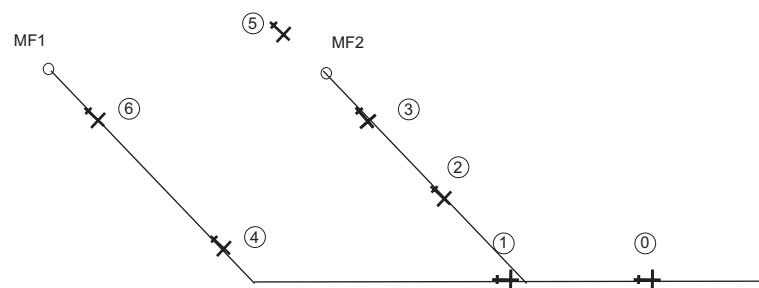


Abbildung 5.32: Fall X Eintritt Lfz 3

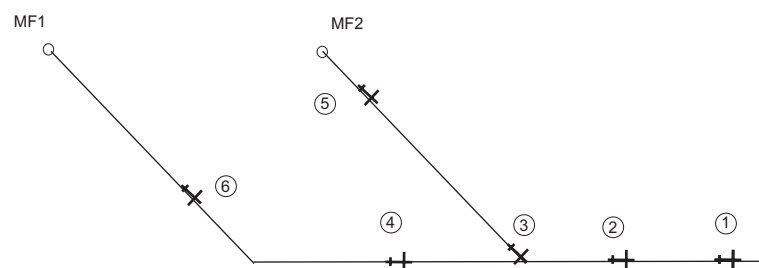


Abbildung 5.33: Fall X, Eintritt Lfz 5

Dann ist eine bestehende Überkreuzbeziehung sicher aufgelöst (Lfz 2 auf Lfz 1). Schert das Target auf die Trajektorie des Trailing ein, kann zur direkten Abstandsbestimmung zurückgekehrt werden.

Da hier nicht mit Schnittpunkten der Tracks gearbeitet werden soll, muss das Erreichen des „Merging Pointes“ durch eine über ADS-B übertragene Information ersetzt werden, die angibt ob sich das momentan übermittelte Target noch überkreuzt oder schon in-trail befindet. Pro Metering Fix darf es dann nur ein Lfz geben, das einem Target aus einem andern Verkehrsstrom folgt. Das erfordert jedoch die Überprüfung der ADS-B Informationen aller in der TMA befindlichen Lfz.

Das Verfahren lässt sich nicht auf ein Konzept mit flexiblen Tracks übertragen, da jede Distanzinformation zum Target im Fächer entlang des Standardlegs gerechnet wird. Somit wären alle Abstandsberechnungen fehlerbehaftet und würden sich durch die Übertragung via ADS-B fortpflanzen.

Aus diesem Grund soll die hier vorgestellten Vorgehensweise nicht weiter verfolgt werden.

5.4.12 FALL XI



Abbildung 5.34: Randbedingungen Fall XI

5.4.12.1 Regelungsverfahren

Bei unbekannten Targets kann bei der Abstandsberechnung wie im Fall IX vorgegangen werden, sobald das Target feststeht.

5.4.12.2 Aktivierung

Für die Initialisierung des neuen Target gilt das gleiche wie in Fall IX. Allerdings muss für jedes Lfz, das die jeweiligen Cross Track Distanz erreicht hat, ein Schnittpunkt mit der Trajektorie des Trailing bestimmt werden. Das Lfz, welches bezogen auf den jeweiligen Referenzschnittpunkt die geringste Distanz zum Trailing aufweist, muss als das zu aktivierende Target angesehen werden. Wie in Fall IV leitet sich der zeitliche Sollabstand aus der detektierten Distanz zum Target ab. Um weitere Fehlidentifikationen zu vermeiden muss gelten, dass ein Target, welches zuvor als potenzielles unter 180° hinstoßendes Target identifiziert wurde, nicht mehr als Target für einen 0°-90° Merging in Frage kommt. Sind die unter 180° hinstoßenden Lfz nicht zuvor identifiziert, kann es bei bestimmten Geometrien sonst dazu kommen (s. Abb 5.35), dass diese als unter 0° bis <90° hinstoßende Lfz angesehen werden, wenn sich das Target noch auf dem entgegengerichteten Leg L1 befindet (Lfz 2 Target für Lfz 3) und das Trailing auf Basis dessen eine Regelung beginnt.

Bei der Verwendung einer Anflugroutengeometrie mit Lärmfächer ergeben sich in Bezug auf dessen Geometrie weitere Einschränkungen.

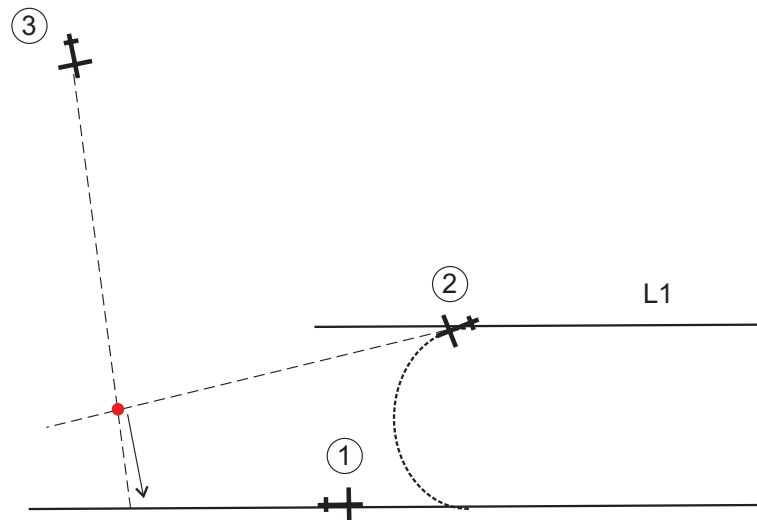


Abbildung 5.35: Auszuschließende Fehlidentifikation des Targets, Fall XI

Im Szenario ohne Übermittlung von Targets ist es erforderlich, dass jedes Lfz sein ihm in der Planung vom AMAN zugedachtes Target fehlerfrei identifiziert und der beabsichtigte zeitliche Abstand (in vielfachen des Standardsollabstandes) eindeutig bestimmbar ist. Jedes Trailing rechnet für die Prädiktion der Trajektorienschnittpunkte mit dem Target zunächst mit der publizierten Standardtrajektorie. Der AMAN hat in seinen Berechnungen jedoch eine abweichende Route für einige der Lfz vorgesehen und gibt dementsprechend modifizierte Zielzeiten für die Einflugpunkte aus, was dazu führt, dass der TCP zu einem anderen Zeitpunkt erreicht wird, als es bei Folgen der Standardtrajektorie korrekt wäre.

Damit bei der gegebenen Geometrie der beabsichtigte Abstand in den Rastergrenzen von $\pm 3,2\text{nmi}$ noch identifiziert werden kann, muss der zulässige Winkelbereich auf 20° beschränkt werden (s. $\alpha_{max}S2$ in Abb. 5.27 und Appendix D).

Im umgekehrten Fall (Trailing nicht über TCP) ist eine Fehlidentifikation ausgeschlossen, da das Target erst gewechselt werden darf, wenn der Track im Fächer bereits eingeschlagen wurde.

5.4.13 FALL XII



Abbildung 5.36: Randbedingungen Fall XII

5.4.13.1 Regelungsverfahren

Ist das hinzustoßende Lfz das Trailing, gibt es theoretisch unendlich viele mögliche Schnittpunkte mit der Trajektorie des Target. Das Trailing prädiziert hier den Abstand zum Target indem es in jedem Schritt davon ausgeht, dass es selbst augenblicklich einen

Turn einleiten würde. Daraus ergibt sich ein Schnittpunkt mit dem Merging-Leg, dem Leg, das Teil der Trajektorie von Target und Trailing ist, auf dem alle unter 180° hinzustoßenden Lfz einscheren. Daraufhin wird der Abstand zu diesem Punkt mit dem Abstand des Target zu diesem Punkt verglichen.

Entspricht der prädierte Abstand dem zeitlichen Sollabstand bei momentaner Geschwindigkeit, leitet das Trailing den Turn ein. Der Referenzpunkt auf dem eine Regelung basiert wird während des gesamten Turns immer neu berechnet, da er sich als Reaktion auf eine Geschwindigkeitsänderung des Target entlang des Merging-Legs verschieben kann. Hat das Target den Merging Point erreicht befindet sich das Trailing wieder in der Intrail-Phase.

Stellt das hinzustoßende Lfz dagegen das Target dar, muss die Prädiktion von dessen Trajektorie vom Trailing vorgenommen werden, das sich bereits auf dem Merging-Leg befindet. Allerdings kann die tatsächliche Abstandsbestimmung erst ab dem Zeitpunkt erfolgen, ab dem das hinzustoßende Target den Turn eingeleitet hat, da das Trailing nicht über die Information verfügt, an welcher Stelle das Target eindreht und zuvor kein Schnittpunkt der beiden Trajektorien existiert. Eine Unterschreitung des Sollabstandes kann jedoch frühzeitig festgestellt werden, indem davon ausgegangen wird dass das Target den Turn augenblicklich einleitet. Unterschreitet der so berechnete Abstand bereits den Sollwert, kann eine Verringerung der Geschwindigkeit des Trailing kommandiert werden, da ein weiteres Verweilen des Targets auf entgegengesetztem Kurs den Abstand noch weiter verringern würde.

Hat das Target den Turn eingeleitet, stellt der Schnittpunkt mit der Merging-Achse den Referenzpunkt für die Regelung dar. Die Prädiktion des Kurvenabschnittes erfolgt wie in Fall V beschrieben.

5.4.13.2 Aktivierung

Um die Regel zur maximalen Anzahl Überkreuzbeziehungen einzuhalten (s. Abschnitt 5.4.1) , müssen weitere Einschränkungen bezüglich der Routengeometrie gefordert werden. Bleibt das Target beim Turn erhalten, kann das Trailing die Trajektorie des Target bis zum Merging Point prädictieren, sobald das Target den Turn eingeleitet hat. Hat das Trailing den korrekten eigenen Abstand zu diesem Merging Point prädictiert, leitet es selbst den Turn ein. Bleibt das Target aber nicht erhalten und muss gewechselt werden, besteht zwischen Trailing und bisherigem Target ein Abstand von mindestens 12,2nmi, da das neue Target zwischen Trailing und bisherigem Target platziert wird. Soll weiterhin gelten, dass das bisherige Target den Merging Point mit dem neuen Target passiert hat, bevor das neue Target aktiviert werden kann, darf die Distanz der beiden entgegengerichteten Legs maximal 7nmi betragen (Toleranzen berücksichtigt). Wäre die Distanz größer, müsste das Trailing selbst den Turn einleiten, bevor es das Target wechseln darf, woraufhin jedoch keine Regelung mehr möglich wäre.

5.4.14 FALL XIII



Abbildung 5.37: Randbedingungen Fall XIII

5.4.14.1 Regelungsverfahren

Ist das Target identifiziert und führt das Trailing den Turn aus, wird vorgegangen wie in Fall XII. Führt das Target den Turn aus gilt Fall VIII.

5.4.14.2 Aktivierung

Zunächst wird wieder die Situation betrachtet, in welcher das auf das Merging-Leg eindrehende Lfz das Trailing darstellt. Da die Targets nicht übertragen werden, sind auch die Sollabstände zu dem vom AMAN beabsichtigten Targets nicht bekannt. Ohne Kenntnis des nächsten Targets muss ein hinzustoßendes Trailing den entgegengerichteten Verkehrsstrom auf „Lücken“ überprüfen. Eine eindeutige Identifizierung eines Target ist nicht möglich, da jeder Punkt entlang des sog Turn-Legs (TL in Abbildung 5.38) für die Einleitung eines Turns zugelassen ist. Ein Trailing wird also die erste verfügbare Lücke für das Merging nutzen. Die Lücke wird identifiziert, indem die Abstände zwischen allen sich auf dem Merging-Leg (mit Cross Track Error Toleranz) befindlichen Lfz berechnet werden. Beträgt der Abstand zwischen zwei Lfz mindestens das doppelte des Standardsollabstandes (1,5nmi Toleranz), ist eine Lücke gefunden. Das Trailing stellt durch rechtzeitiges Einleiten der Kurve den Sollabstand her. Hier muss eine Zone festgelegt sein, in der das Eindrehen erlaubt ist. Diese Zone kann durch ein in der Anflugprozedur speziell markiertes Leg (Turnleg TL in Abb. 5.38) gekennzeichnet sein.

Hier entsteht jedoch das Problem, dass diese Lücke (L1 in Abb 5.38) vom AMAN ggf. für eine weiteres am nächsten Merging Point hinzukommendes Lfz (Lfz 3) vorgehalten und erst die darauffolgende Lücke L2 für das hinzustoßende Lfz bestimmt war, wodurch die ursprünglich beabsichtigte Sequenz gestört wird. Eine sich dadurch kurzzeitig ergebende Verlängerung der Transition vor dem Turn auf das Final, kompensiert sich im weiteren Verlauf jedoch selbstständig (vgl. Abb. 5.40, 5.41 und 5.42 in Abschnitt 5.5).

Ist die Sequenz nicht optimiert, wie heute der Fall, würde die Anwendung dieser Methode also keine negativen Auswirkungen hervorrufen. Geht man in der Zukunft von einer gekoppelten optimierten An-/Abflug-Sequenz aus, würden die Sollabstände in der Sequenz für das Eindrehen auf das Final ohnehin auf dem Gegenanflug neu geordnet. Eine vorzeitige Berücksichtigung von Abfluglücken in der Anflugsequenz (z.B. bereits über dem Metering Fix) ist aufgrund der unbeeinflussbaren zeitlichen Streuung der Bodenprozesse nicht realistisch, sodass auch in diesem Fall nichts gegen die „falsche“ Nutzung von Lücken spricht.

An dieser Stelle muss auch die Situation betrachtet werden, in der zwei in der Sequenz aufeinanderfolgende Lfz den Turn auf das Merging-Leg ausführen. Das vorausfliegende Lfz, also das aktuelle Target, bleibt so lange erhalten, bis es den Turn einleitet. Nun muss

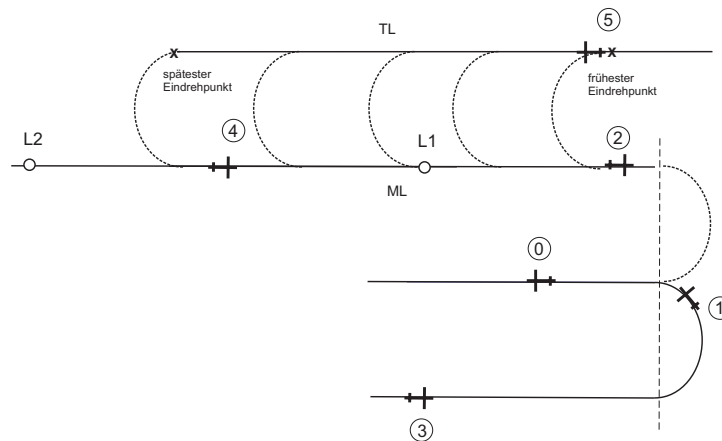


Abbildung 5.38: Lückennutzung beim 180° Turn und unbekannten Targets

das Trailing prüfen, welchem Lfz es als nächstes folgen soll. Dazu muss das Trailing eine Lücke auf dem Merging-Leg detektieren. Die erste verfügbare Lücke ist jedoch für das gerade eindrehende bisherige Target bestimmt. Dies kann aber erst detektiert werden, wenn sich das ursprüngliche Target dem Merging-Leg bis auf die Cross Track Error Toleranz genähert hat. Das bedeutet für das Trailing dass kontinuierlich nach dem neuen Target gesucht werden muss bis der Turn letztendlich eingeleitet wird. Um zu vermeiden dass das Trailing eindreht, bevor das bisherige Target die Lücke beansprucht muss gelten, dass die Wegstrecke vom Einleiten des Turns bis zum Erreichen des Merging-Legs nicht kürzer sein darf als der Standardsollabstand. Dies bedeutet bei typischen Geschwindigkeiten und Hängewinkeln, dass das Turn-Leg und das Merging-Leg maximal 4,5nmi voneinander entfernt sein dürfen.

Das Trailing wird dann die unmittelbar danach folgende Lücke als ihm zugehörig detektieren und eindrehen, womit neues und altes Target identisch sind.

In der umgekehrten Situation in welcher die Lfz die den Turn ausführen, müssen, wie auch in Fall VIII, potenzielle Targets welche auf das Merging-Leg die Trajektorie des Trailing unter 180° hinzustoßen, von vornherein identifiziert sein, um danach nicht mehr als unter 0°-90° hinzustoßendes Target in Frage zu kommen.

Auch hier gilt, dass nach Targets mit entgegengesetztem Track nur im üblichen Abstand zur eigenen Trajektorie gesucht werden darf (hier 4,5nmi). Da der Abstand zwischen Gegenanflug und Endanfluggrundlinie etwa ebenso groß ist, müssen die Lfz ausgeschlossen werden, die sich bereits stromabwärts auf der Anfluggrundlinie befinden.

5.5 Final Turn

5.5.1 Aktivierung

Beim Final Turn werden in der betrachteten Geometrie zwei Verkehrsströme durch jeweils einen 180°-Turn zusammengeführt.

Das Konzept lässt sich ebenfalls auf eine Zwei-Landebahnen Layout übertragen, bei welcher eine aus zeitlicher Sicht einzige Sequenz hergestellt wird, in der die Endanflüge parallel zueinander versetzt sind.

Zunächst sind die Targets bekannt. Der Wechsel in der Regelung von einem Target aus gleicher Anflugrichtung auf ein Target aus der gegenüberliegenden Anflugrichtung kann erst stattfinden, wenn das künftige, bereits bekannte Target seinen Final Turn eingeleitet hat, da bis dahin beide Trajektorien versetzt parallel zueinander verlaufen und zwischen den beiden Lfz theoretisch jeder beliebige Abstand herrscht.

Sind die Targets nicht bekannt, muss jedes Lfz sein Target nach festgelegten Regeln selbst identifizieren. Hier kann folgendermaßen vorgegangen werden. Sobald das bisherige Target die Trajektorie des Trailing verlässt, muss nach einem neuen Target gesucht werden. Auch hier kann das alte Target identisch mit dem neuen sein. Existiert nach dem Eindrehen des bisherigen Targets zwischen den beiden Gegenanflügen kein weiteres Lfz, das gleichweit oder weiter vom Airport Reference Point (ARP) entfernt ist als das Trailing, bleibt das bisherige Target erhalten.

Wie in Fall XIII in Abschnitt 5.4 beschrieben, kann es bei unbekannten Targets dazu kommen, dass bestehende Lücken im Anflugstrom falsch genutzt wurden und nun die Lfz blockiert, für welche diese Lücke ursprünglich vorgesehen war. Daher muss jedes Lfz bei der Identifizierung seines finalen Targets zusätzlich überprüfen, ob ein Lfz existiert, welches annähernd die selbe Entfernung zum Airport Reference Point aufweist wie es selbst. Hier muss durch Regeln unmissverständlich festgelegt werden, welches der Lfz den Turn zuerst einleiten darf, da sonst Kollisionsgefahr besteht.

In den meisten Fällen wird es zutreffen, dass ein Lfz, welches bei einem vorigen 180° Turn eine Lücke unvorhergesehenerweise genutzt hat, keine weitere Lücke direkt vor sich hat, da es sonst bereits diese genutzt hätte. Das in Abb. 5.39 aus Süden kommende Lfz dagegen hat dann in den meisten Fällen eine Lücke vor sich, da diese für das auf gleicher Höhe im Norden befindliche Lfz vorgehalten wurde. Es gilt nun also, dass jedes Lfz, welches ein weiteres Lfz auf gleicher Höhe detektiert, prüfen muss, ob das nächste weiter entfernte Lfz sich auf demselben oder dem gegenüberliegenden Gegenanflug befindet. Bewegt sich das weiter entfernte Lfz auf dem gegenüberliegenden Downwind hat es selbst Vorrang (Lfz 3 hat Vorrang in Abb. 5.39). Befindet sich das nächstliegende Lfz im selben Anflugstrom, ist das nächste Target das Lfz, mit dem es soeben konkurriert hat (Lfz 3 ist Target für Lfz 5). Das nachrangige Lfz muss dann die Transition weiter ausfliegen.

Diese Überprüfung muss jedoch abgeschlossen sein, bevor das die Regel festlegende Lfz den Turn eingeleitet hat. Lfz 4 hat nach der oben beschriebenen Regel zwei potenzielle Targets identifiziert (Lfz 3 und Lfz 5). Es muss nun jedoch abwarten, welches der beiden zuerst den Turn einleitet. Das länger auf dem Downwind verbleibende Lfz ist dann das Target.

Wie in Abbildungen 5.40 bis 5.42 zu sehen, kompensiert sich die Länge der Transition im weiteren Verlauf selbst, da die zuvor nicht genutzte Lücke zur Verkürzung der Transition genutzt wird.

Generell gilt, dass die Transition am schnellsten wieder die ursprüngliche Länge erreicht, wenn das Lfz, welches die falsche Lücke genutzt hat, auch dasjenige ist, das die Transition weiter ausfliegt. Existieren falsch genutzte Lücken beiderseits der Anfluggrundlinie,

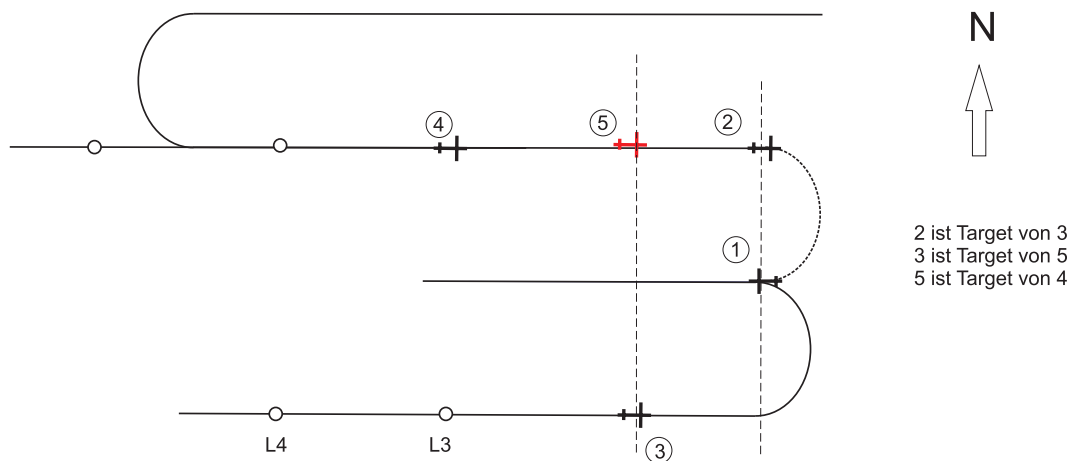


Abbildung 5.39: Situation bei falsch genutzter Lücke vor dem Final Turn (Lzf 5)

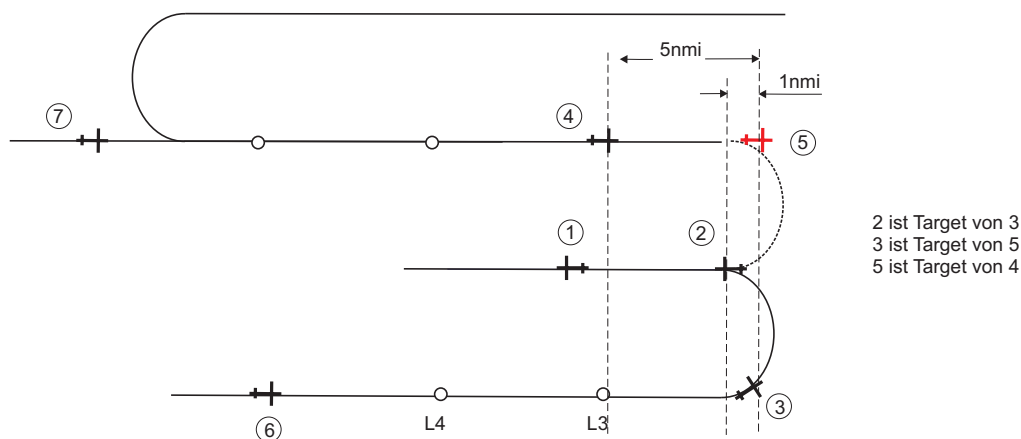


Abbildung 5.40: Verlängerung der Transition durch das Lzf, das die falsche Lücke genutzt hat (Lzf 5)

kann dies jedoch nicht identifiziert werden und es muss eine weitere Regel aufgestellt werden.

Werden die Wirbelschleppenkategorien übertragen soll die Rangfolge greifen, die die kürzeste Wirbelschleppenstaffellungsänge ergibt. Dabei gilt, dass dem vorausfliegenden Lzf (Lzf 2 in Abb 5.39) ein Lzf folgen sollte, das der gleichen Wirbelschleppenkategorie angehört. Kann über diese Regel keine Entscheidung getroffen werden, muss festgelegt werden, welcher Verkehrsstrom generell Vorrang hat. Die Verlängerung der Transition wird in jedem Fall wieder kompensiert, da die Anzahl der in die TMA einfliegenden Lzf vorgesteuert wurde. Eine Störung der Sequenz lässt sich an dieser Stelle jedoch nicht vermeiden.

Schlussendlich stellt sich noch die Frage, wie für die Lzf die endgültigen Staffellungsabstände bestimmt werden.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Wirbelschleppenkategorie der Lzf via ADS-B zu kommunizieren. Damit wäre der Sollabstand entsprechend der Mindeststaffelungen ableitbar. Dies ist allerdings nur für eine reine Landebahn bei Standardwerten für die Staffelung anwendbar. Größere Separationen z.B. aufgrund von Wettereinfluss sind nicht ermittelbar.

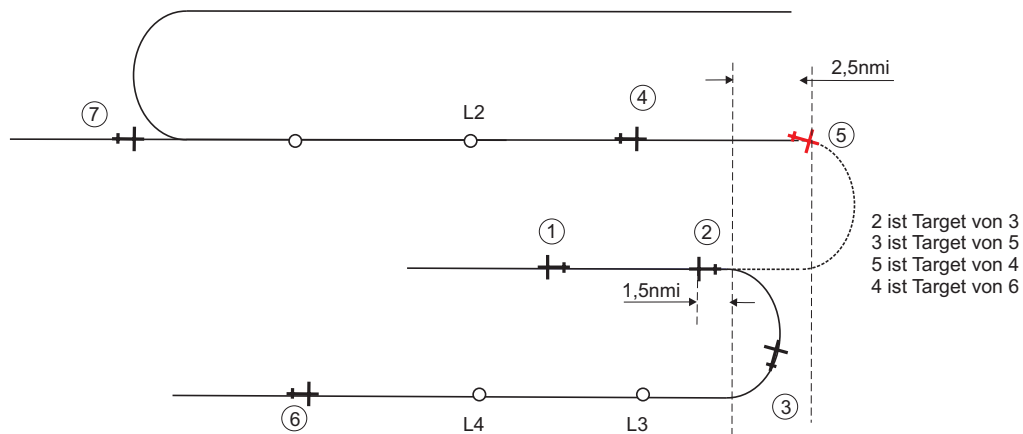


Abbildung 5.41: Eindrehpunkt des Lfz, das die falsche Lücke genutzt hat (Lfz 5)

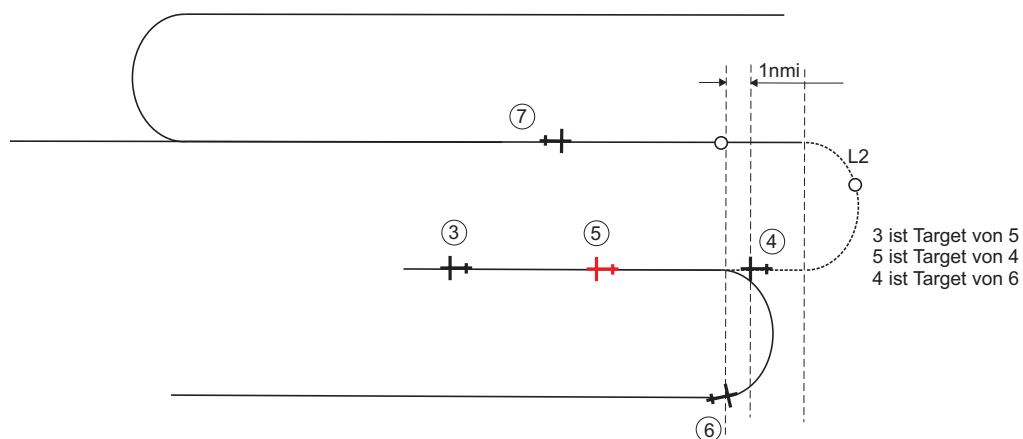


Abbildung 5.42: Nach erfolgter Kompensation

Im Mixed Mode Betrieb oder bei abhängigen Runways besteht keine andere Möglichkeit als die neuen Sollabstände an die Trailing Aircraft zu übertragen, während diese sich auf dem Gegenanflug befinden. Dies kann manuell von der Arbeitsposition des Feederlotsen geschehen, oder bei der Verwendung eines gekoppelten AMAN/DMAN automatisiert erfolgen.

Bei der Festlegung der finalen Sollabstände müssen auch die unterschiedlichen Endanfluggeschwindigkeiten berücksichtigt werden.

5.5.2 Regelungsverfahren

Es wird davon ausgegangen, dass bis zu diesem Punkt des Anfluges immer Vielfache des mittleren Sollabstandes etabliert waren. Die Herstellung der endgültigen Staffellingsabstände muss also durch die Wahl des korrekten Eindrehzeitpunktes erreicht werden.

Ein fester Merging Point würde dies verhindern. Folglich werden in diesem Flugabschnitt keine Fälle untersucht, die auf ein festgelegtes Merging Fix zurückgreifen.

Aus demselben Grund sind für die Phase des Final Turn auch keine Wegpunkte vorgesehen.

Ist das Target identifiziert, kann im Fall mit Targets und im Fall ohne Targets gleichermaßen vorgegangen werden.

Ab dem Zeitpunkt, zu dem das bisherige Target den Turn einleitet, kann das Trailing damit beginnen, den Eindrehpunkt zur Herstellung des korrekten Abstandes zum neuen Target zu berechnen, der aufgrund von den etablierten Vielfachen des mittleren Sollabstands abweichender finaler Sollabstände entweder vor oder hinter dem Eindrehpunkt des Target liegt. Wie bereits in Abschnitt 5.5 erwähnt, können altes und neues Target identisch sein.

Die Art der Berechnung ist davon abhängig, ob das Trailing, um den endgültigen Sollabstandswert herzustellen, die Distanz zum Target verkürzen oder verlängern muss.

Soll der Abstand verringert werden, prüft das Trailing ab dem Moment des Eindrehens des Targets kontinuierlich, wo es selbst die Anfluggrundlinie schneiden würde, wenn es selbst in diesem Moment den Turn einleitete. Die Flugzeit bis zu diesem Punkt wird daraufhin verglichen mit der prädictierten Ankunftszeit des Target an diesem Punkt (vgl. Abb. 5.44). Allerdings darf hier die Differenz der Abstände der Gegenanflüge zur Grundlinie nicht kleiner sein, als der kleinste Endsollabstand dividiert durch π , da dann das Trailing zum Zeitpunkt des Eindrehens des Targets, selbst bei sofortigem Einleiten des Turns den Sollabstand nicht mehr herstellen könnte (s. Abb. 5.43).

Soll Wegstrecke verlängert werden, muss umgekehrt vorgegangen werden. Das Trailing prüft, wann das Target die Anfluggrundlinie schneidet und berechnet daraufhin, wann es selbst an diesem Punkt ankommt. So wird vermieden, dass das Trailing eine Entfernung des Target zu einem Schnittpunkt berechnen muss, den das Target nie erreicht (P0 in Abb. 5.45).

Es wird nun kontinuierlich überprüft, ob bei sofortigem Eindrehen der korrekte Abstand zum Target hergestellt würde. Sobald dieser Punkt erreicht ist wird der Turn initiiert.

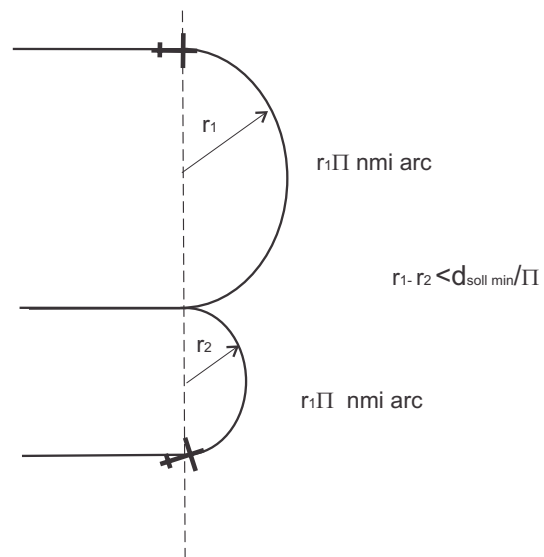


Abbildung 5.43: Geometriebeschränkung bei Verkürzung des Sollabstandes im Final Turn

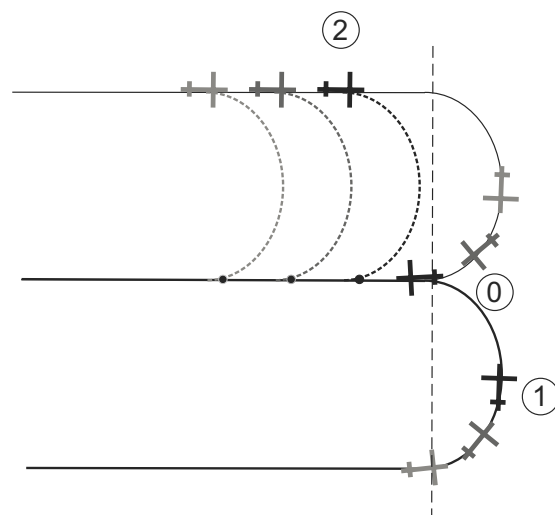


Abbildung 5.44: Prädiktion bei Verkürzung des Abstandes im Final Turn

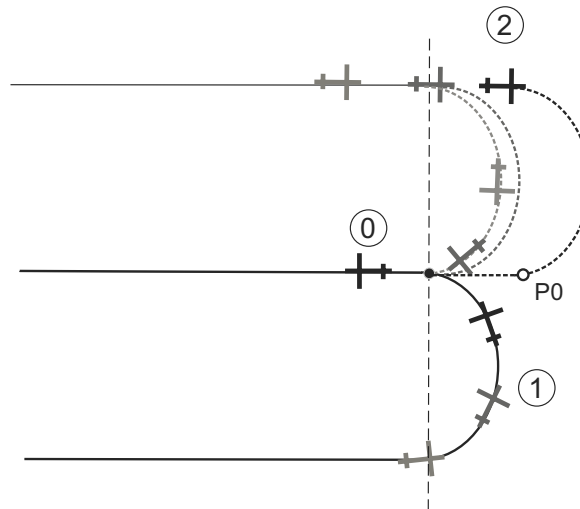


Abbildung 5.45: Prädiktion bei Vergrößerung des Abstandes im Final Turn

Hat das Target die Anfluggrundlinie erreicht ($x_{te} < 0,5 \text{ nmi}$), kann dieser Punkt als Referenzpunkt für eine Abstandsbestimmung herangezogen werden.

Die oben beschriebene Methode kann auch Anwendung finden, wenn das bisherige Target beim Turn auf das Final erhalten bleibt, es also aus dem selben Verkehrsstrom stammt.

Für die Regelung kommt lediglich ein PP-Verfahren in Frage. Dieses ist unabhängig davon, ob das neue Target aus einem anderem Verkehrsstrom stammt, oder ob das neue Target mit dem alten identisch ist. Hat das Target den Referenzpunkt erreicht und befindet sich auf der Trajektorie des Trailing, ist wieder eine Intrail-Phase aktiv. Ab diesem Zeitpunkt soll auf ein PPP-Verfahren gewechselt werden.

Ein CTP-Verfahren würde sich in der Kette negativ auswirken, da das Target nach nur wenigen Meilen bereits mit der Verzögerung auf seine finale Anfluggeschwindigkeit beginnen wird und der bekannte Effekt auftreten würde. Daher kann ab dem Punkt, ab dem das Trailing den Referenzpunkt erreicht, auch nur auf ein CTD-Verfahren gewechselt werden.

Die Regelungsverfahren in dieser Phase sind hier der Vollständigkeit halber aufgeführt. Da durch das Entkoppeln beim Eindrehen auf den Endanflug (Abbruch Intrail-Phase, vgl. Abschnitt 5.3) kein Ketteneffekt entstehen kann, ist eine separate Simulation dieser Phase nicht erforderlich.

Kapitel 6

Simulation

Mit der vorliegenden Arbeit kann nur ein indirekter Nachweis für eine Erhöhung der Kapazität durch die Anwendung von ASAS in der TMA erbracht werden, indem gezeigt wird, dass mittels ASAS der heute angewendete Planungspuffer reduziert werden kann. Durch Simulation einer langen Kette von Lfz in den einzelnen Teilabschnitten und bei den Übergängen zwischen den ASAS-Phasen soll demonstriert werden, dass ein reibungsloser Verkehrsablauf in der TMA möglich ist, welcher den vorgegebenen zeitlichen Sollabständen präzise folgt und in dem keine Instabilitäten induziert werden.

Hierfür sind jedoch zunächst die geeigneten Regelungsmethoden zu identifizieren.

6.1 Szenarienauswahl

In den obigen Abschnitten wurden Lösungen für die Zusammenführung von Verkehrsströmen mittels ASAS unter verschiedenen Randbedingungen erarbeitet. Um eine Aussage darüber zu treffen, welche der Mergingmethoden am besten geeignet sind, muss eine Bewertung im Hinblick auf verschiedene Kriterien erfolgen. Diese sind:

- Sicherheit
- Flexibilität
- Komplexität
- Stabilität
- Umwelteinfluss
- Wirtschaftlichkeit

Die Art und Weise des Merging steht in engem Zusammenhang mit den in den unterschiedlichen Phasen verwendeten Regelungsmethoden. Eine endgültige Bewertung kann daher erst durch eine Simulation erfolgen. An dieser Stelle sollen anhand der Kriterien, die ohne Simulation der Teilphasen bereits eine Bewertung zulassen, eine Vorauswahl der letztlich zu simulierenden Szenarien getroffen werden, in welchen dann die verbleibenden für eine effiziente Verkehrsabwicklung ebenso wichtigen Kriterien untersucht werden.

Sicherheit ist wie bei allen im Luftverkehr ergriffenen Maßnahmen der wichtigste Aspekt und stellt eine einzuhaltende Randbedingung dar. Separationsunterschreitungen unter die Radarmindeststaffelung von 5nmi dürfen daher in keinem der Verfahren auftreten. Ein Nachweis erfolgt erst durch die Simulation.

Der für die Flexibilität relevante Teilaspekt steht hier im direkten Zusammenhang mit dem Umwelteinfluss. Es sind Verfahren zu bevorzugen, die eine Streuung der Lärmbelastung zulassen, wie es in den oben beschriebenen Konzepten ohne festen Merging Fix der Fall war (Ausnahme Fall X).

Die Flexibilität für den Lotsen ist gegeben, wenn genügend Freiraum für eine Änderung im Ablauf oder das Aufbrechen von Ketten besteht, ohne dass Konfliktsituationen provoziert werden. Dies gilt für alle Merginggeometrien mit 180° -Gegenanflügen. Daraus lässt sich die generelle Empfehlung ableiten, bei der Gestaltung von Anflugprozeduren möglichst auf diese Geometrie zurückzugreifen. Allerdings steht dies in gewisser Weise im Widerspruch zur Wirtschaftlichkeit, da dies längere Flugstrecken mit sich bringt. In dichtem Verkehr überwiegen jedoch der Sicherheits- und der Flexibilitätsaspekt. Da hier die TMA des Flughafens Frankfurt am Main als Beispiel dient, die sowohl Merging unter spitzen Winkeln als auch Merging unter 180° beinhaltet, stellt die so interpretierte Flexibilität kein Auswahlkriterium dar. Die Flexibilität für den Piloten im Sinne einer variablen Gestaltung des Höhenprofils bleibt erhalten.

In Bezug auf die Komplexität spielt der Umfang der benötigten Datengrundlage eine wichtige Rolle. Mit zunehmender Menge fremdbestimmter Daten wächst die Abhängigkeit von der fehlerfreien Übertragung dieser Daten und damit das Risiko, das Regelungskonzept bei einem Ausfall nicht aufrecht erhalten zu können. Es sind daher jene Konzepte für das Merging zu bevorzugen, bei welchen auf möglichst wenige Datenelemente zurückgegriffen werden muss.

Auch die Komplexität der zugrundeliegenden Algorithmen muss betrachtet werden. Zwar ist bei der Durchführung der notwendigen Berechnungen in der heutigen Zeit nicht von Rechenzeitproblemen auszugehen, jedoch sollte die Menge der für die geometrischen Berechnungen benötigten Daten der Anfluggeometrien möglichst gering gehalten werden.

Ein weiterer Aspekt der Komplexität ist die Nachvollziehbarkeit der ASAS-Manöver für den Lotsen. Hier wurde jedoch bereits bei der Erstellung der Konzepte gefordert, dass pro Verkehrsstrom jeweils nur eine Überkreuzbeziehung bestehen darf. Dieser Aspekt stellt demnach kein Auswahlkriterium dar.

Im Hinblick auf die Stabilität ist der rechtzeitige Regelungsbeginn relevant. Einige Verfahren erlauben hier zwar einen früheren Beginn als andere, allerdings wäre dafür wiederum eine umfangreiche Datenübertragung erforderlich (Wegpunkte). Bei mittlerer bis hoher Verkehrsdichte resultiert die Einschränkung der Anzahl an Überkreuzbeziehungen jedoch ohnehin in der restriktiveren Vorgabe (Intrail-Target muss den Mergepunkt passiert haben). Ob der im Verfahren frühestmögliche Regelungsbeginn für die Bildung einer stabilen Lfz-Kette ausreichend ist, lässt sich nur mit einer Simulation bewerten.

In Bezug auf die Stabilität gilt es mittels der Simulation für alle Flugphasen und Übergänge Merging- und Regelungsverfahren nach Bewertung folgender Kriterien auszuwählen:

- schneller und vollständiger Abbau des zeitlichen Fehlers
- ausreichend schnelle Annäherung an die Referenzgeschwindigkeit
- geringe Geschwindigkeitsschwankungen

Obige Bewertungskriterien sind auch in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit relevant. Ein angewandtes Anflugverfahren ist nur wirtschaftlich, wenn der Treibstoffverbrauch minimiert wird und die Triebwerke keine unnötigen Lastwechsel erfahren, was durch viele Geschwindigkeitsänderungen während des Anflugs hervorgerufen würde. Dieser Einfluss schlägt sich gleichermaßen in Bezug auf die Umweltbelastung nieder, welcher das letzte der Bewertungskriterien darstellt.

Das Kriterium der Umweltverträglichkeit selbst ist ebenfalls wieder im Zusammenhang mit dem der Stabilität zu sehen. Wie beschrieben, sehen einige Verfahren für das Merging die Streuung von Lärm über variable Merging Points vor. Bei einer Simulation muss nachgewiesen werden, dass die beabsichtigten Tracks der Lfz eingehalten wurden, was durch die unter Stabilität aufgeführten Bewertungskriterien gewährleistet wird.

Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird in der Regel auch immer die Frage nach dem Einfluss von Maßnahmen auf die Kapazität gestellt. Die Überlegung, dass die ergriffenen Maßnahmen zu einer Steigerung der Kapazität beitragen, stellt die Motivation dieser Arbeit dar. Ein Nachweis dafür kann aber wie bereits festgestellt im Rahmen dieser Arbeit nur indirekt erfolgen (genauere Durchführung = reduzierter Planungspuffer).

Bei der Auswahl der Mergingvarianten für die Simulationsszenarien müssen vor allem in Bezug auf die Komplexität Abwägungen vorgenommen werden. Es werden daher zwei Szenarien untersucht. Beide Szenarien erfüllen das Kriterium der Flexibilität, da für das Merging nur Fälle ausgewählt werden, bei denen kein fester Merging Point verwendet wird. Ein Arrivalmanager hat damit die Möglichkeit durch Steuerung der Überflugzeitpunkte am Metering Fix auch die Lage der Punkte zu beeinflussen, an denen die Verkehrsströme zusammengeführt werden, ohne den jeweiligen Punkt explizit veröffentlichen zu müssen.

Szenario 1 betrachtet den Fall, dass eine Übertragung der gültigen Reihenfolge der Targets technisch realisiert werden kann und somit auch die Sollabstände übermittelt werden. Szenario 1 beinhaltet aufgrund der bekannten Targets auch die Phase des Merging vor dem Metering Fix. Das Merging setzt sich aus den Fällen IX und XII zusammen.

In **Szenario 2** wird davon ausgegangen, dass die Targetreihenfolge dem jeweiligen Lfz nicht bekannt ist. Die relative Führung beginnt deshalb erst am Metering Fix. Szenario 2 betrachtet die Fälle XI und XIII. Die Targets müssen aus der Position aller umgebenden Lfz abgeleitet werden. Aus diesem Grund sind bestimmte Raster in den Separationen einzuhalten, um die korrekte Identifizierung des zeitlichen Sollabstandes zu ermöglichen. Daraus ergeben sich zusätzliche Routengeometriebeschränkungen. In beiden Szenarien liegen den Lfz keine Wegpunktlisten des umgebenden Verkehrs vor. Die Datenübertragung beschränkt sich darüberhinaus auf die Übertragung der Position und der Wirbelschleppenkategorie. Tabelle 6.1 zeigt die Rahmenbedingungen im Überblick.

	Szenario 1	Szenario 2
Targetliste verfügbar	x	
Separationswertübermittlung	x	
Position der Lfz bekannt	x	x
flexible Merging Points	x	x
Wegpunkte der Lfz bekannt		

Tabelle 6.1: Zusammenfassung Rahmenbedingungen Szenario 1 und Szenario 2

6.2 Annahmen

6.2.1 Wind

Die Stellgröße für das Erreichen des geforderten Sollabstandes ist die Bahngeschwindigkeit. Bei Auftreten von Wind wird dieser vom Bahngeschwindigkeitsregler entsprechend berücksichtigt.

Die im koordinierten Kurvenflug ohne Wind über Grund beschriebenen Kreissegmente würden durch das Auftreten von Wind verzerrt. Im Kurvenflug ohne Wind basiert die Prädiktion der Trajektorie des Targets durch das Trailing auf der Annahme, dass sich ein Kurvenradius entsprechend der momentanen Geschwindigkeit und einem Hängewinkel von 25 Grad einstellt. Unter Windeinfluss wird davon ausgegangen, dass diese Trajektorie durch entsprechenden Regeleingriffe beibehalten wird (ähnlich einem DME Arc). Ein Trailing Aircraft passt dann im Kurvenflug bei einem erforderlichen Regeleingriff den Radius entsprechend seiner neuen Geschwindigkeit so an, dass er dem Radius im Fall ohne Wind entspricht. Dies macht die Prädiktion der Trajektorie, wenn dieses Lfz wiederum als Target dient, für das Trailing berechenbar.

Da ein in der Kurve befindliches Trailing nach dem PPP-Verfahren auf einen Referenzpunkt regelt, kann es dazu kommen, dass nach Erreichen des Referenzpunktes eine abweichende Geschwindigkeit kommandiert wird. Das Trailing muss dann erst auf die Geschwindigkeit des Target beschleunigen oder verzögern. Der Fehler, der hierbei entsteht, unterscheidet sich in der Auswirkung jedoch nicht von Fehlern, die im Turn im Fall ohne Wind entstehen (s. Abschnitt 6.3.4). Aufgrund dieser Überlegungen wird es für die vorliegende Arbeit nicht als notwendig erachtet die Simulationen unter dem Einfluss von Wind durchzuführen.

6.2.2 Geschwindigkeitsregelung

Die Geschwindigkeitsregelung erfolgt im Thrust-Mode. Der Pitch-Mode ist der Höhenregelung vorbehalten.

6.2.3 Lfz-Muster und Daten

Die Abbildung des Verkehrs wurde auf die fünf häufigsten Luftfahrzeugs-Muster begrenzt. Deren Anordnung in der Lfz-Kette ist zufällig. Die Performancedaten wurden der

BADA Datenbank der Eurocontrol entnommen (Version 3.6). Die Liste der verwendeten Parameter findet sich in Anhang E.

Es wird mit in den BADA-Daten hinterlegten Referenzmassen der Lfz-Typen gearbeitet. Die Flugzeugmasse wird über den Betrachtungszeitraum als konstant angenommen.

6.2.4 Anflugverfahren

In der Realität findet in der Phase von Einflug in die TMA bis kurz nach Abschluss des Final Turns über eine Strecke von ca. 80nmi ein Höhenabbau von FL110 auf FL70 statt. Der Anflug kann sowohl im Step Descent als auch in einem Continuous Descent Approach mit einem Flughöhenwinkel von weniger als 1° stattfinden.

Da die Handlungsmöglichkeiten vielfältig sind, wird hier keine Annahme bezüglich des Höhenprofils getroffen.

Da als Lead Aircraft jeweils das Lfz mit dem geringsten Verzögerungsvermögen gewählt wurde, können Separationsunterschreitungen verursacht durch unterschiedliche LFZ-Typen im CTD-Verfahren nicht auftreten.

Dies gilt sowohl für den Horizontalflug als auch für den Sinkflug. Für ein CTP-Verfahren muss mittels der Simulation nachgewiesen werden, dass Staffelungsunterschreitungen nicht auftreten. Existieren keine Staffelungsunterschreitungen im Horizontalflug, werden auch bei Verzögerung im Sinkflug keine auftreten, da das jeweilige Verzögerungsvermögen geringer ist.

6.2.5 Bewegungsgleichungen

Alle Betrachtungen beziehen sich auf das Flugzeug als Punktmasse.

Die Bewegungsgleichungen in flugbahnfesten Koordinaten lauten unter der Annahme, dass Flugbahnschiebewinkel und Flugbahnanstellwinkel gleich Null sind (vgl. [Bro94])

$$m\dot{V}_K = F - W - mg \sin \gamma \quad (6.1)$$

$$m\dot{\chi} V_K \cos \gamma = A \sin \Phi \quad (6.2)$$

$$m\dot{\gamma} V_K = A \cos \Phi - mg \cos \gamma \quad (6.3)$$

Im Kurvenflug soll davon ausgegangen werden, dass keine Höhenänderung vorgenommen wird bzw. der Bahnwinkel sehr klein ist. Damit wird 6.1 vereinfacht zu

$$m\dot{V}_K = F - W - \gamma mg \quad (6.4)$$

und mit $\cos \gamma = 1$ folgt aus 6.2 und 6.3

$$\dot{\chi} = \frac{g}{V_K} \tan(\Phi) \quad (6.5)$$

Der geflogene Radius ist dann

$$r = \frac{V_K}{\dot{\chi}} = \frac{V_k^2}{g \tan \Phi} \quad (6.6)$$

Dies ist der Radius, der vom Trailing Aircraft bei der Prädiktion der Trajektorie des Target unter der Annahme $\Phi = 25^\circ$ zur Abstandsbestimmung verwendet wird.

Mit $V_A = V_K$ gilt

$$W = S c_w \frac{\rho}{2} V_K^2 \quad (6.7)$$

und

$$A = S c_a \frac{\rho}{2} V_K^2 \quad (6.8)$$

Es wird zur Anwendbarkeit der BADA Datensammlung eine symmetrische Polare angenommen

$$c_w = c_{w0} + k c_a^2 \quad (6.9)$$

Der Auftriebsbeiwert wird auf Basis dieser Daten jeweils aus Gleichung 6.3 abgeleitet und auch für kleine Winkel γ angewendet.

Widerstand und Auftrieb in Gleichungen 6.1, 6.2 und 6.3 werden mittels 6.7, 6.8 und 6.9 ersetzt.

6.3 Diskussion der Simulationsergebnisse

Kapitel 5 beschreibt die für die Simulation pro Anflugphase ausgewählten Regelungsverfahren. Diese werden im folgenden Abschnitt bezüglich ihrer Eignung für den Einsatz in einer langen Kette von Lfz evaluiert und die Simulationsergebnisse den Bewertungskriterien gegenübergestellt.

Pro Anflugphase wird sowohl auf das Szenario mit Targetübermittlung als auch auf das Szenario ohne Targetübermittlung eingegangen (Ausnahme: Merging am Metering Fix).

6.3.1 Merging am Metering Fix

Die Phase des Merging am Metering Fix ist nur für das Szenario mit Targetübermittlung relevant.

Wie in der Szenarienbeschreibung angegeben, wendet das Trailing Aircraft in der Phase des Merging am Metering Fix nach der Initialisierung des Target zunächst ein PP-Verfahren mit Prädiktion auf das Fix an und wechselt zum PPP-Verfahren, sobald das Target das Metering Fix passiert hat.

Die Länge des letzten Legs vor dem Metering Fix wurde mit 50nmi angenommen. Die Initiierung des ASAS-Verfahrens beginnt, wenn das Trailing diesen Punkt erreicht

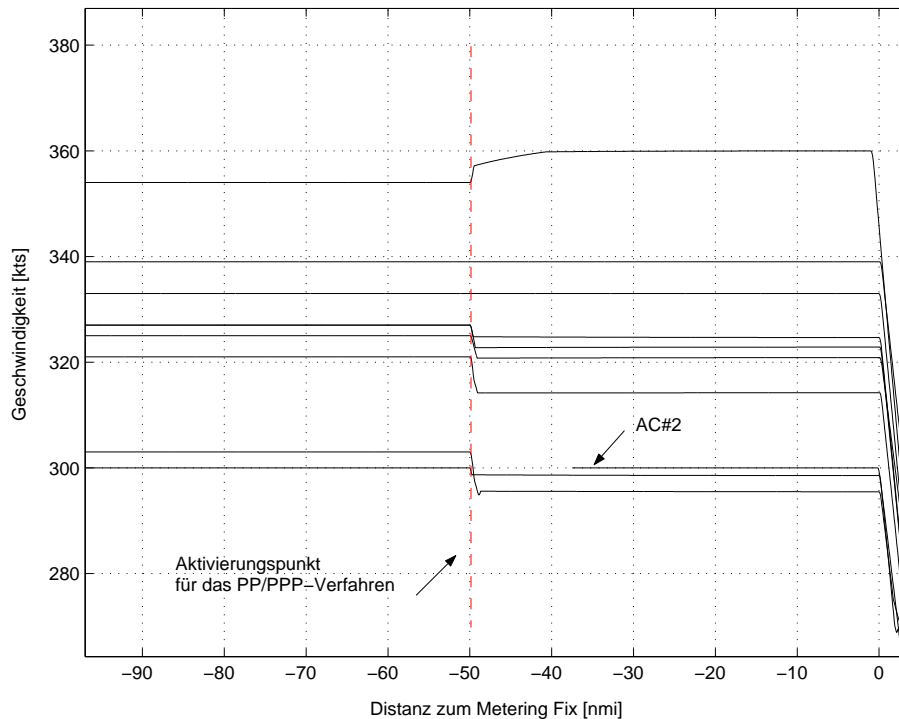


Abbildung 6.1: Geschwindigkeiten bei PP und anschließendem PPP bei Regelung vor dem Metering Fix

hat. Würde das ASAS-Verfahren beginnen, wenn das Target diesen Punkt erreicht hat, befänden sich die Trailing Aircraft je nach vorgesehenem Sollabstand in unterschiedlichen Entfernungen zu diesem Punkt. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit für den Lotsen sollen sich die ASAS-Verfahren aber auf einen festgelegten geographischen Bereich beschränken.

An dieser Stelle wurde von einem maximalen relativen Fehler von 20 Sekunden ausgegangen (abgeleitet aus Fähigkeiten des 4D FMS; $\pm 10s$ Ungenauigkeit des Trailing plus $\pm 10s$ Ungenauigkeit des Target). Der detektierte Fehler wird bei Erreichen des Initiierungspunktes durch eine sofortige Geschwindigkeitsanpassung ausgeglichen (s. Abb. 6.1)- Hier sind $\pm 15kts$ im Vergleich zur Initialgeschwindigkeit zugelassen.

Das zweite Lfz der Kette befindet sich bei Beginn der Simulation bereits jenseits des Aktivierungspunktes, ca. 40nmi vor dem Metering Fix. Für dieses wurde ein Fehler von 0s angenommen.

Erfährt das Target keine weitere Geschwindigkeitsänderung, behält auch das Trailing die eingestellte Geschwindigkeit bis zum Erreichen des Metering Fix bei. Wie Abbildung 6.2 zeigt, ist die Strecke von 50nmi bei einer zugelassenen Geschwindigkeitsabweichung von 15kts meist ausreichend, um die Fehler zu kompensieren. Kleine Fehler werden aufgrund der Schubstabilisierung nicht vollständig ausgeglichen. Bei Ausgangsgeschwindigkeiten, die nahe der Grenze zum zugelassenen Geschwindigkeitsbereich liegen, kann es jedoch dazu kommen, dass ein größerer Restfehler bestehen bleibt. Im vorliegenden Beispiel müsste ein Trailing Aircraft mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 355kts auf eine Geschwindigkeit von weit über 360kts GS beschleunigen um den Fehler rechtzeitig zu kompensieren. Durch die Begrenzung auf 360kts kann der Fehler nicht vollständig abgebaut werden,

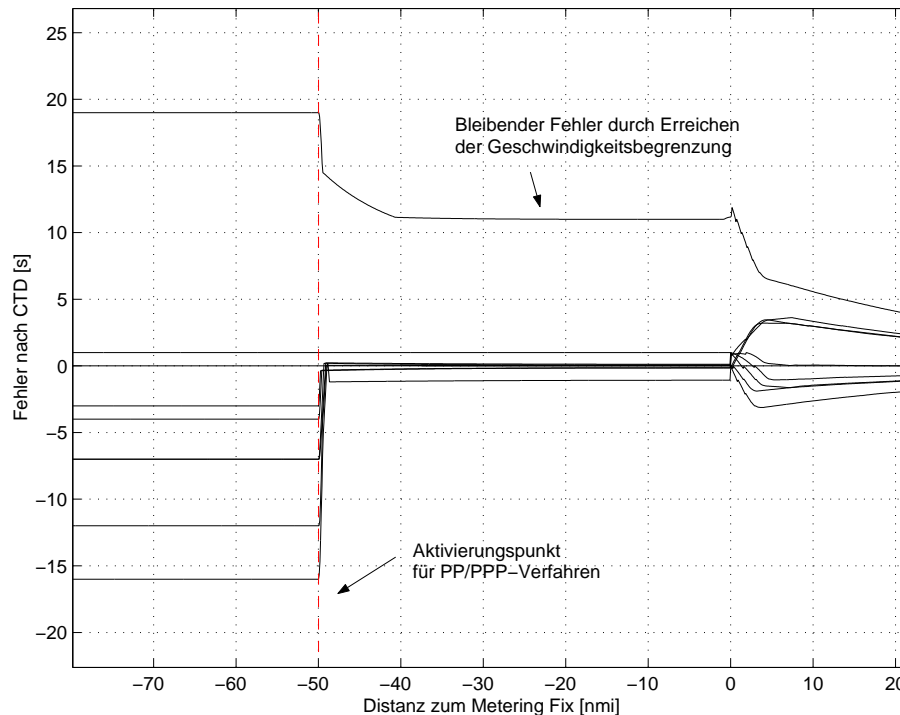


Abbildung 6.2: Fehlerverlauf nach CTD-Prinzip bei PP und anschließendem PPP-Verfahren bei Regelung vor dem Metering Fix

so dass hier ein Restfehler von 11 Sekunden verbleibt (s. Abb. 6.2). Im schlimmsten Fall bewegt sich das Lfz bereits mit der Maximal- oder Minimalgeschwindigkeit, so dass überhaupt keine weitere Kompensation erfolgen kann. Das bedeutet, dass der maximale Fehler von 20s bei der Initialisierung bis zum Erreichen des Metering Fix bestehen bleibt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei Erreichen des Metering Fix noch Fehler bestehen, ist jedoch geringer, als im Fall der nicht relativen Regelung auf Basis des 4D-FMS im Fall ohne Targetübermittlung. Die absolut erreichbare Genauigkeit unterscheidet sich allerdings in beiden Szenarien nicht, da der AMAN nicht in allen Fällen durch eine Neusequenzierung vermeiden kann, dass für die Herstellung des korrekten Abstandes der zulässigen Geschwindigkeitsbereich verlassen wird.

Hinzu kommt, dass aufgrund der Luftraumstruktur vor dem Metering Fix nicht immer 50nmi Strecke mit konstantem Track zur Verfügung stehen und im Szenario ohne Targetübermittlung deshalb bei Ankunft ebenfalls noch Fehler bestehen können.

6.3.2 Intrail-Phase

In diesem Abschnitt wird untersucht, welches der ASAS-Regelungsverfahren sich für die Intrail-Phase am besten eignet. Dabei soll auch berücksichtigt werden, dass die Anfluggeometrie einen Trackfächer beinhaltet. Die Randbedingungen zur Einhaltung der zulässigen Abweichung vom Fächertrack und zur korrekten Identifizierung des Sollabstandes im Fall ohne Targetübermittlung bei Erreichen des TCP müssen eingehalten werden.

Im vorliegenden Szenario findet ab dem Metering Fix eine Verzögerung auf die optimale Geschwindigkeit statt, mit der der Verkehrsfluss ohne Kapazitätseinschränkung aufrechterhalten werden kann (geringe Geschwindigkeiten führen zu geringen Staffellungen, aber hier ggf. Kapazitätsverlust durch 5nmi Mindeststaffelung). Diese Referenzgeschwindigkeit beträgt laut Anflugprozedur 220kts IAS, was bei den typischen und in der Prozedur festgelegten Höhen einer Groundspeed von 265kts entspricht.

Aus den Aktivierungsrandbedingungen in Abschnitt 5.4.10 ergibt sich, dass die TMA-Grenze nicht wie heute der Fall, mit dem neu eingeführten Trajectory Change Point (TCP) zusammenfallen kann, da bei Eintritt in die TMA noch ein wesentlich größerer Geschwindigkeitsbereich zugelassen werden soll. Erst in der ersten Intrail-Phase soll eine Angleichung stattfinden.

Die Simulation muss zeigen, welche Weglänge vonnöten ist, um die Randbedingungen am TCP bei den zu erwartenden Fehlern zu erfüllen. Diese bestimmt dann die Mindestdistanz des Metering Fixes zum TCP.

Als Lead Aircraft sollte ein träges Lfz mit guten aerodynamischen Eigenschaften dienen, um zu vermeiden, dass ASAS-Fehler bereits allein durch nicht ausreichendes Verzögerungsvermögen aller Trailing Aircraft hervorgerufen werden.

Es wird hier ein A340 gewählt, der bei Erreichen des Metering Fixes, ausgehend von einer mittleren Geschwindigkeit von 300kts GS bei Eintritt in die TMA, auf die Referenzgeschwindigkeit von 265kts GS verzögert und diese Geschwindigkeit bis nach dem Final Turn aufrechterhält.

Zunächst wird das Verhalten der Kette in der ersten Intrail-Phase bei der Anwendung eines MCTD-Verfahrens unter der Annahme untersucht, dass alle Fehler am Metering Fix kompensiert sind. Dies erleichtert im ersten Schritt die Analyse des Verhaltens in der Kette.

Abbildungen 6.3 und 6.4 zeigen den Geschwindigkeits- und Fehlerverlauf einer Kette von 10 Lfz bei einem initialen Geschwindigkeitsbereich zwischen 280kts und 360kts GS.

Ist bei zuvor ausgeglichenem Fehler das Trailing Aircraft langsamer als das Target, wird bei der Berechnung nach CTD ab diesem Zeitpunkt jedoch mit jedem Berechnungsschritt festgestellt werden, dass sich das Target bereits früher an demselben Ort befunden hat, als es nach Abzug des Sollabstandes hätte der Fall sein sollen und beginnt daraufhin ebenfalls zu beschleunigen und sich dem Geschwindigkeitsprofil des Targets anzugleichen. Der Fehler wächst dabei trotzdem langsam an, da um den Fehler auszugleichen, das Trailing ab dem Moment in dem der Fehler zu wachsen beginnt, sofort dieselbe Geschwindigkeit wie das Target annehmen müsste. Dies ist jedoch nicht möglich, da das Trailing zunächst auf diese Geschwindigkeit beschleunigen oder verzögern muss. Daher wächst der Fehler zunächst weiter. Wenn das Trailing die Geschwindigkeit des Target erreicht hat, muss es wiederum einige Zeit schneller oder langsamer fliegen als das Target, um den Fehler wieder zu verringern und auf Null zu reduzieren.

Es ist zu erkennen, dass starke Geschwindigkeitsänderungen hervorgerufen werden. Bei Initialgeschwindigkeiten zwischen 280kts und 360kts kann es vorkommen, dass die Trailing Aircraft zunächst um über 30kts beschleunigt, dann weit unter die Referenzgeschwindigkeit verzögert und daraufhin wieder beschleunigen muss.

Dies ist der Regelungsmethode geschuldet, die wie in Abschnitt 4.3.2 bzw. 4.3.1 definiert, die bei verschwindendem Fehler als kommandierte Geschwindigkeit die Geschwindigkeit

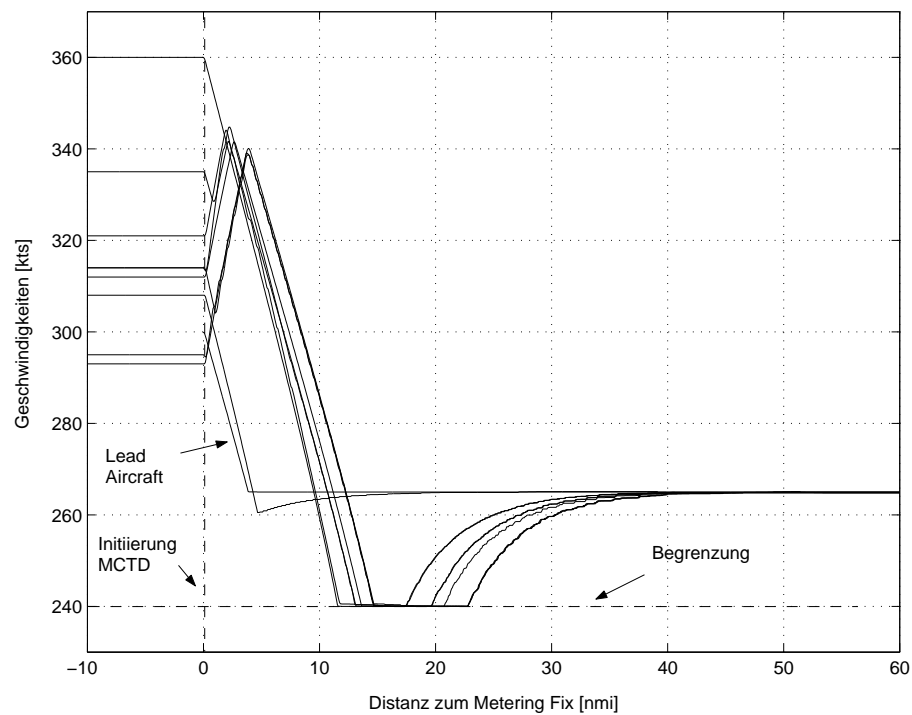


Abbildung 6.3: Geschwindigkeiten bei MCTD-Verfahren und Verzögerung des Lead am Fix

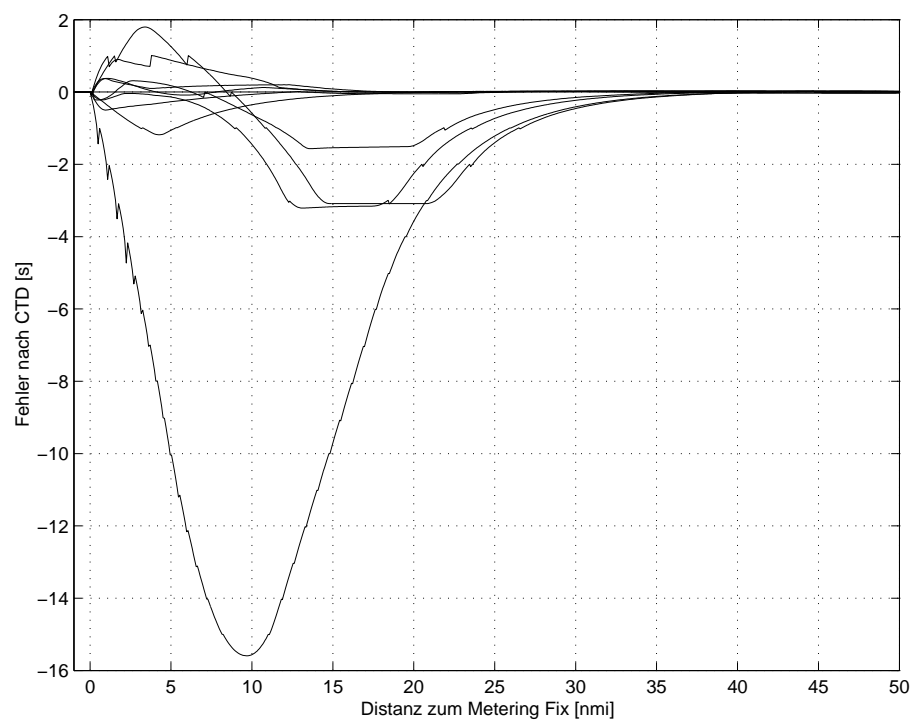


Abbildung 6.4: Fehler nach CTD bei Verzögerung des Lead am Metering Fix

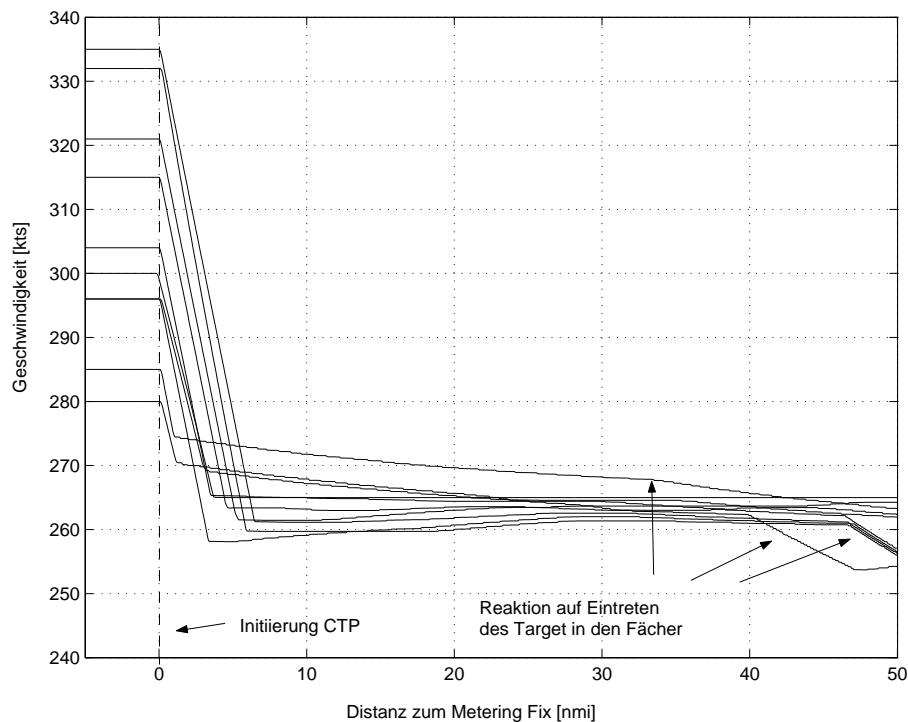


Abbildung 6.5: Geschwindigkeiten im CTP-Verfahren mit stromabwärtsliegendem Fächer

des Target vorgibt, die dieses aufwies, als es sich an der momentanen Position des Trailing befand.

Es ist deshalb offensichtlich, dass diese Regelungsmethode in der ersten Phase nur wenig geeignet ist. Die kommandierten Geschwindigkeiten reichen bei der hier gewählten Regelverstärkung bis an die untere Begrenzung, weshalb der Fehlerverlauf einiger Lfz zeitweise konstant ist. Die entstehenden Fehler werden so nach einer Strecke von ca. 30 nmi wieder kompensiert.

Abbildungen 6.5 und 6.6 zeigen im Vergleich dazu das Verhalten der Kette bei der Verwendung eines CTP-Verfahrens, ebenfalls bei ausgeglichenen initialen Fehlern.

Man sieht deutlich den stetigeren Geschwindigkeitsverlauf. Beim bis dorthin angewendeten Verfahren gilt, dass das Trailing das Metering Fix n-90 Sekunden nach dem Target erreicht.

Der Fehler nach CTP berechnet sich hier auf andere Art und Weise als bei CTD. War das Target seit passieren des Metering Fix schneller als das Trailing bei Initiierung, wird beim Umschalten auf die Fehlerbestimmung nach CTP detektiert, dass der zeitliche Abstand zu groß ist und das Trailing beschleunigt. Umgekehrt, wenn das Target seit Erreichen des Metering Fix langsamer war als das Trailing bei Initiierung ergibt sich, dass das Trailing bereits zu dicht aufgefliegen ist und kommandiert eine Geschwindigkeitsrücknahme.

Die Fehler nach CTP können daher zu Beginn große Werte annehmen, da die Lfz ihre Geschwindigkeit nicht sprunghaft ändern können.

Die Geschwindigkeit des Trailing gleicht sich langsamer an die des Target an, als es im MCTD-Verfahren der Fall ist. Eine stromaufwärts gerichtete Ausbreitung geringerer

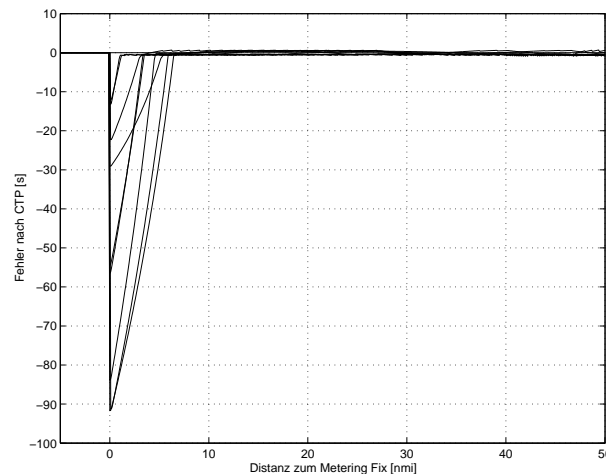


Abbildung 6.6: Fehler im CTP-Verfahren mit stromabwärts liegendem Fächer

Geschwindigkeiten wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben kann hier nicht stattfinden, da das CTP-Verfahren erst bei Erreichen des Metering Fixes initiiert werden darf.

Allerdings kann es je nach Lage des TCP dazu kommen, dass das Target zu dem Zeitpunkt, zu dem das Trailing die TMA erreicht, bereits in den Fächer eingetreten ist oder sich bereits jenseits des Fächers befindet. Die Abstandsberechnung erfolgt immer entlang der Standardtrajektorie, da sich erst beim Wechsel auf das neue Target aus dem anderen Verkehrsstrom entscheidet, welcher Track im Fächer geflogen werden soll.

Das bedeutet, dass das Trailing den Abstand immer zu gering einschätzt, wenn der Standardtrack nicht mit dem vom AMAN beabsichtigten Track im Fächer übereinstimmt, da nicht bekannt ist, dass die Wegstrecke des Trailing eigentlich länger sein wird als zum aktuellen Zeitpunkt ermittelbar.

Da aber nicht gewollt ist, dass das Trailing den so fälschlicherweise ermittelten Fehler unmittelbar durch eine Geschwindigkeitsrücknahme kompensiert, kann das CTP-Verfahren nicht bis zum Erreichen des TCP aufrecht erhalten werden. Ein größerer Fehler baut sich, wie in Abb. 6.6 zu sehen, nicht mehr auf.

Ebenso kann es vorkommen, dass das Trailing beim CTP-Verfahren auf andere weiter stromabwärts liegende Störungen reagiert und somit die am TCP geforderten Randbedingungen nicht einhalten kann.

Abbildungen 6.7 und 6.8 zeigen die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Trailing und dem künftigen aus dem hinzumergenden Verkehrsstrom stammenden Target sowie den Fehler, der nach dem PP-Verfahren entlang des Standardlegs resultieren würde. Durch die oben beschriebenen Effekte ergeben sich auch noch 50nmi stromabwärts vom Metering Fix Geschwindigkeitsdifferenzen von etwas über 10 Knoten. Der korrespondierende zeitliche Fehler liegt bei ca. 15 Sekunden, sodass mit dieser Kombination laut Abbildungen 5.28 und 5.29 im Fächer mit Trackabweichungen von bis zu 8° zu rechnen ist.

Die Schlussfolgerung aus den obigen Betrachtungen lautet, dass sich das CTP-Verfahren für die erste Phase des Eintritts in die TMA besser eignet als das MCTD-Verfahren, aber im weiteren Verlauf vor Erreichen des TCP auf ein MCTD-Verfahren gewechselt werden sollte, um vom Verhalten der Lfz im Fächer und stromabwärts liegenden Störungen unabhängig zu sein.

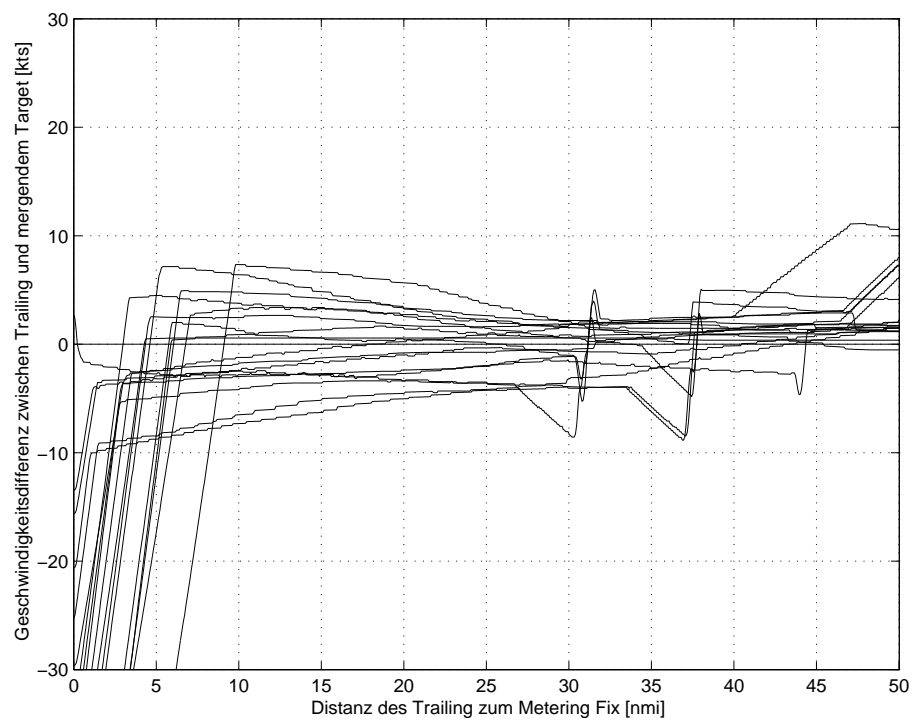


Abbildung 6.7: Geschwindigkeitsdifferenzen mergender Lfz bei Sollabständen zwischen 90s und 540s und stromabwärts liegendem Fächer im CTP-Verfahren

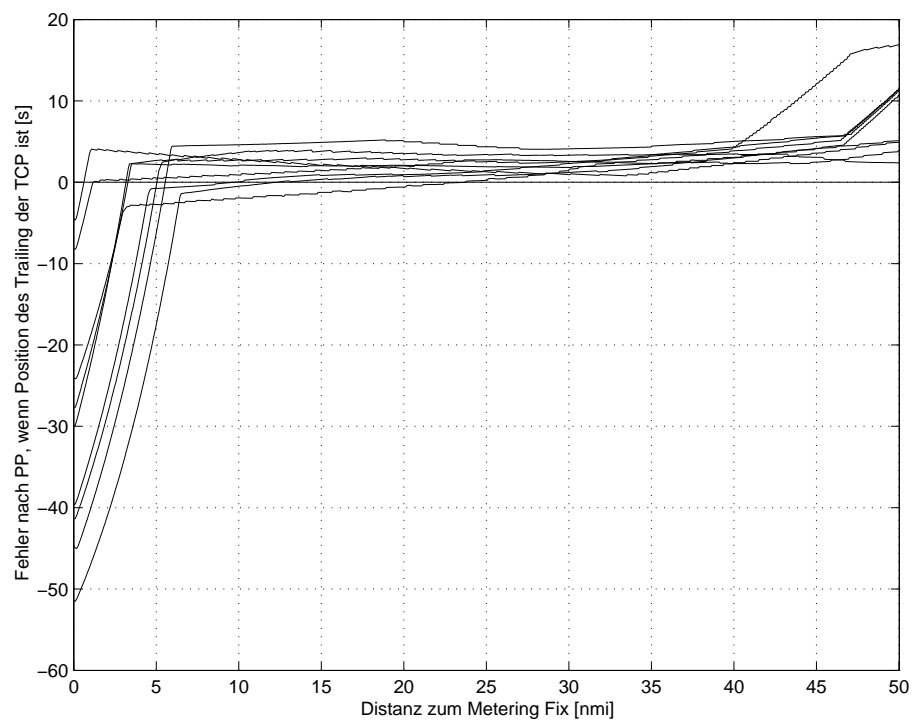


Abbildung 6.8: Fehler nach PP Prinzip bei beliebigen Sollabständen und stromabwärts liegendem Fächer im CTP-Verfahren

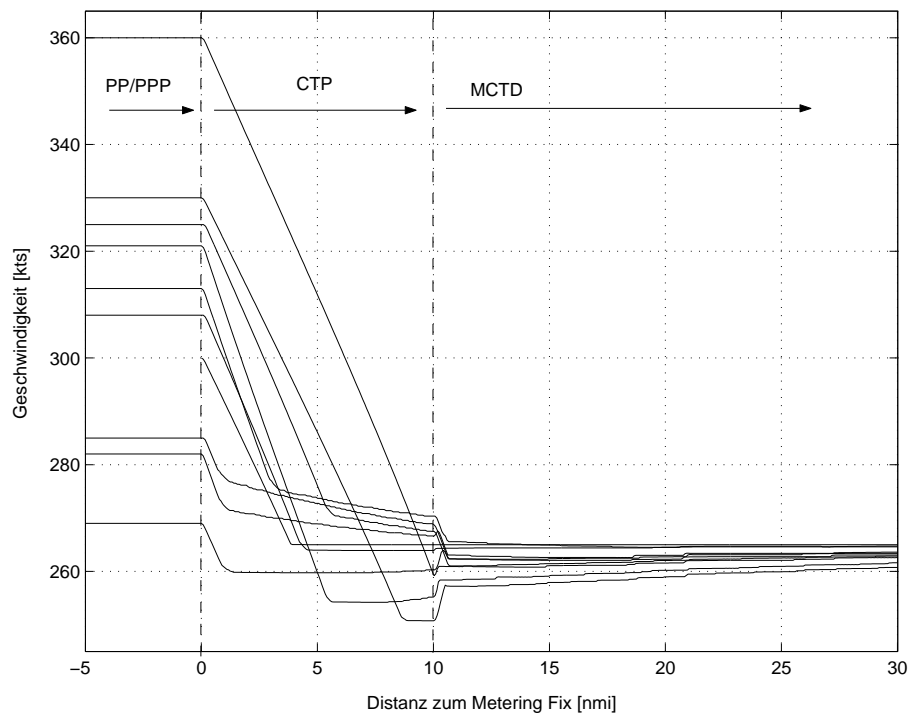


Abbildung 6.9: Geschwindigkeiten bei Wechsel von CTP auf MCTD-Verfahren nach 10nmi und Sollabständen von 90s

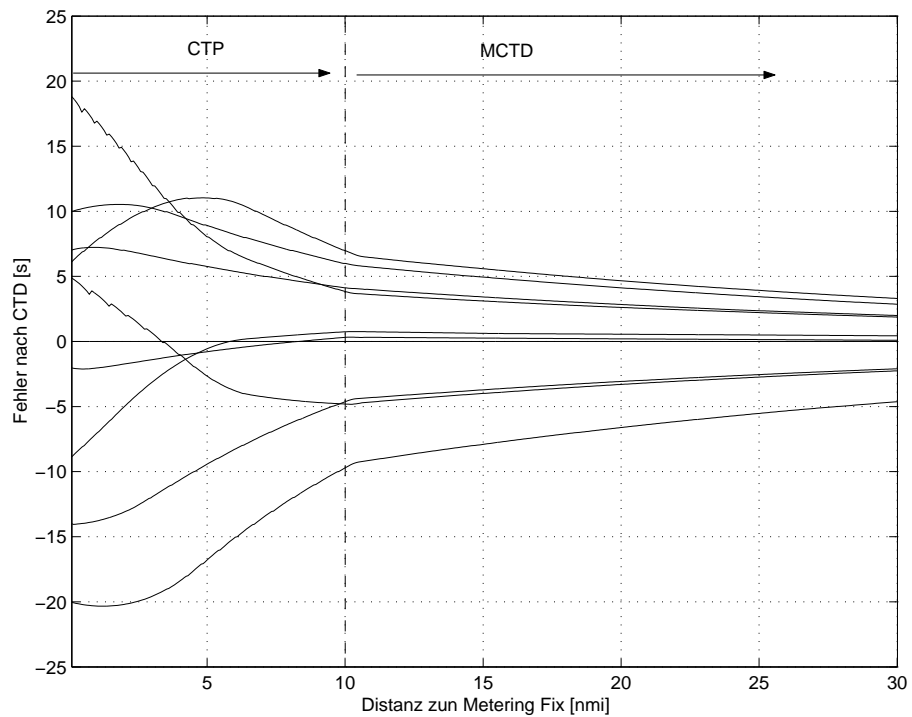


Abbildung 6.10: Fehler nach CTD Prinzip bei kombiniertem CTP-MCTD-Verfahren und Sollabständen von 90s

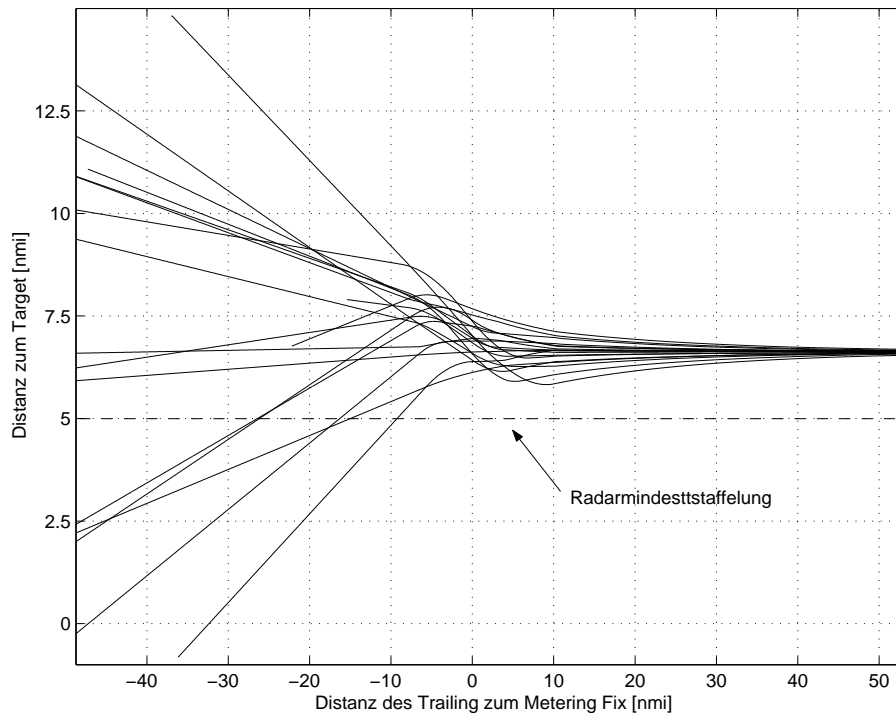


Abbildung 6.11: Distanz zum Target bei kombiniertem CTP-MCTD-Verfahren und Mindeststollabständen von 90s

Eine Kombination der beiden Verfahren erscheint daher sinnvoll. Abbildungen 6.9 und 6.10 zeigen den Geschwindigkeits- und Fehlerverlauf in der Kette von 10 Lfz bei einer Kombination der beiden Verfahren bei Sollabständen von 90s. Für die Einhaltung der Randbedingungen am Targetwechsellpunkt stellt dies das Worst-Case Szenario dar. Der maximale initiale Fehler beträgt hier ± 20 Sekunden.

Die Analysen für ein Szenario ohne Targetübermittlung schließen daher auch das Szenario mit Targetübermittlung ein. Die initialen Fehler im Fall mit Targetübermittlung werden jedoch sehr häufig Null betragen. Das Umschalten von CTP- auf MCTD-Verfahren erfolgt 10nmi stromabwärts vom Metering Fix, da sich hier auch die Geschwindigkeit der Lfz mit sehr hoher Initialgeschwindigkeit der Referenzgeschwindigkeit genähert hat und somit größere Geschwindigkeitsschwankungen bei Anwendung des MCTD vermieden werden.

Abbildung 6.11 zeigt die resultierenden Separationen zwischen den Lfz im kombinierten Verfahren und Sollabständen von 90s für alle Lfz. Die Kurven beginnen bei der jeweiligen Distanz zum Metering Fix, die das Lfz bei Initiierung aufwies.

In der CTP-Phase kann eine Unterschreitung der Radarmindeststafelung von 5nmi nur auftreten, wenn bei geringer werdenden Geschwindigkeiten durch das unterschiedliche Verzögerungsvermögen noch größere Fehler bestehen. Dies ist nicht der Fall. Ab dem Wechsel bei 10nmi haben sich die Geschwindigkeiten der Lfz soweit angeglichen, dass im MCTD-Verfahren eine Staffelungsunterschreitung nicht auftritt. Das Verfahren ist somit als sicher zu bewerten.

Es soll nun festgelegt werden, in welcher Entfernung zum Metering Fix der TCP platziert werden kann. Abbildung 6.13 zeigt wieder den nach PP berechneten Fehler der sich

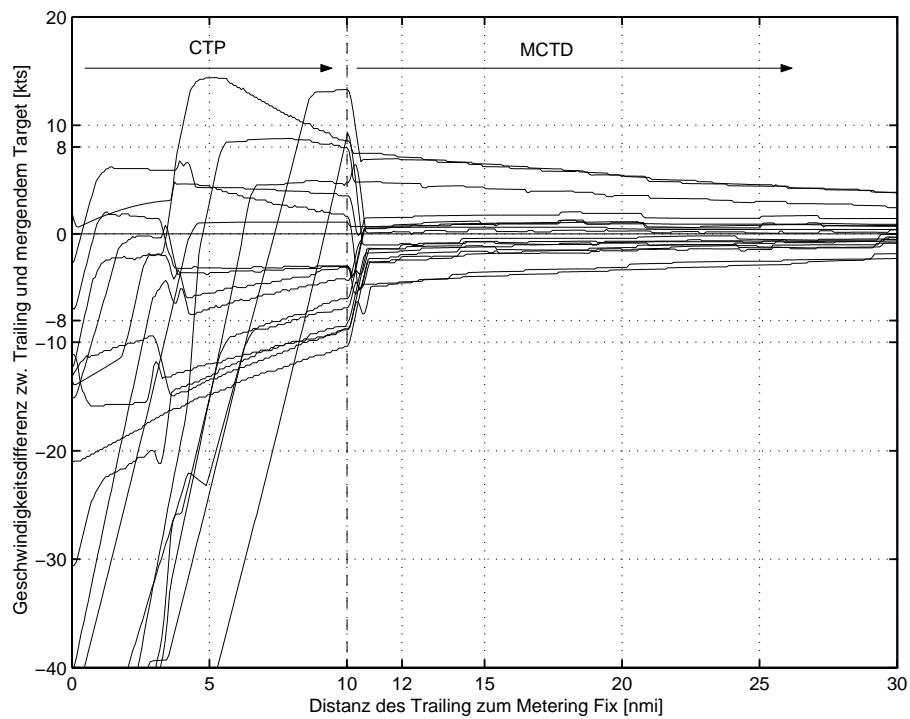


Abbildung 6.12: Geschwindigkeitsdifferenzen beim Wechsel von CTP auf MCTD nach 10nmi und Sollabständen von 90s

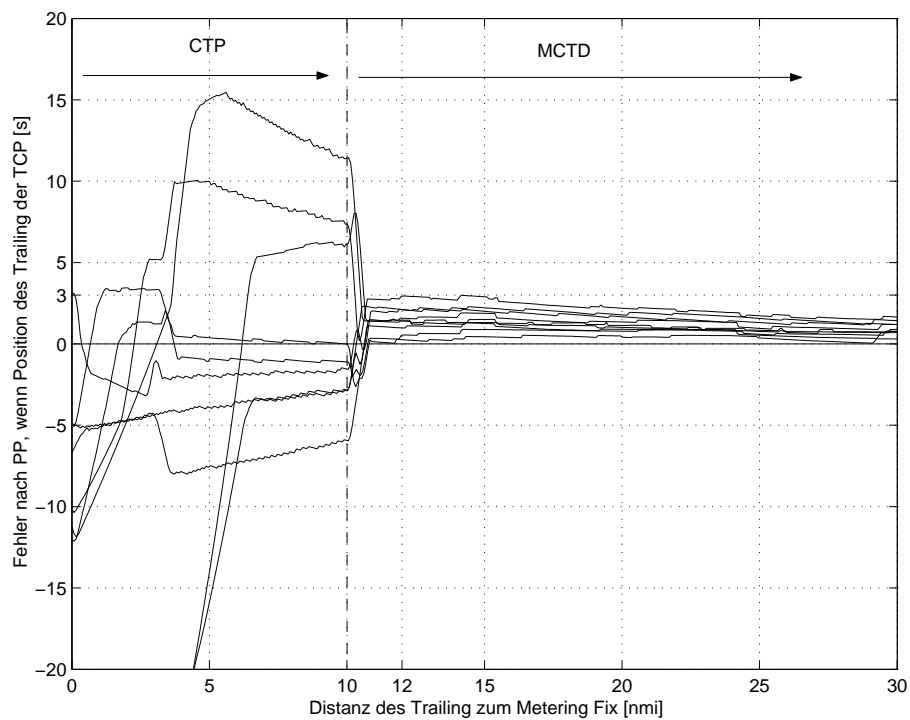


Abbildung 6.13: Fehler nach PP Prinzip bei Wechsel von CTP auf MCTD nach 10nmi und Sollabständen von 90s

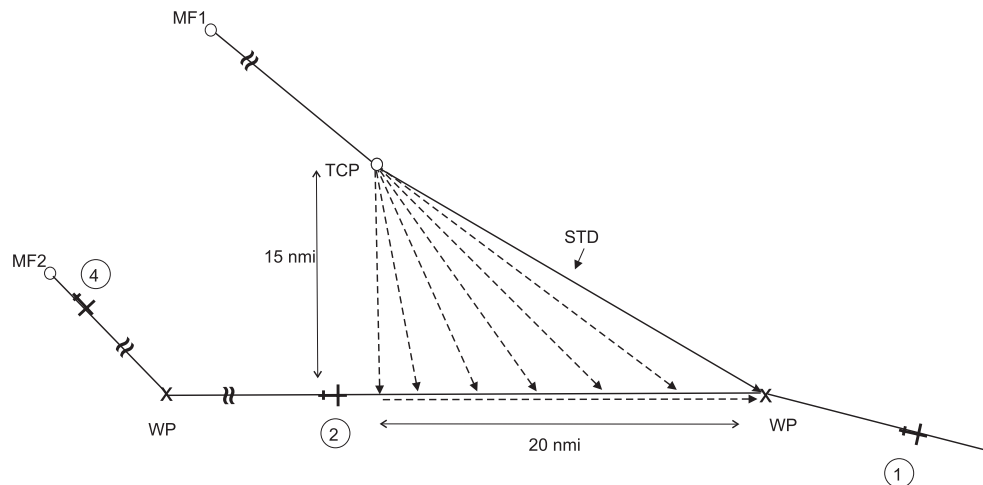


Abbildung 6.14: Betrachtete Anfluggeometrie

zum folgenden Target aus dem hinzumergenden Verkehrsstrom ergäbe, wenn sich der TCP jeweils an der aktuellen Position des Trailing befinden würde. Abb. 6.12 zeigt die Geschwindigkeitsdifferenz zum anvisierten Target.

Laut Abbildung 5.29 kann damit kurz nach dem Umschalten auf das MCTD-Verfahren (nach ca. 12nmi) eine Trackabweichung im Fächer von unter 4° erreicht werden. Die Randbedingungen für ein Szenario ohne Targets sind an dieser Stelle gleichermaßen erfüllt.

In jeder der folgenden Intrail-Phasen kann auf ein CTP-Verfahren verzichtet und direkt ein MCTD-Verfahren angewendet werden, da sich die Geschwindigkeiten ausreichend angeglichen haben.

6.3.3 Merging bei Winkeln unter 90°

Abbildungen 6.17 bis 6.15 zeigen die Geschwindigkeits- und Fehlerverläufe einer Kette von 20 Lfz beim Merging von zwei Verkehrsströmen unter 90° . Der Targetwechsel und damit der Wechsel auf das PP/PPP-Verfahren erfolgt für alle Lfz, die über den TCP einfliegen (s. Abb. 6.14) erst am TCP, da ansonsten vor Erreichen des TCP auf einen falschen Mergpunkt geregelt würde. Im vorliegenden Beispiel ist der TCP 20nmi stromabwärts vom Metering Fix platziert. Der Target- und Verfahrenswechsel der Lfz im anderen Verkehrsstrom erfolgt sobald sich das Target auf die vorgeschriebene Mindestdistanz (hier 15nmi) genähert hat.

Die Betrachtung in Abschnitt 6.3.2 berücksichtigte nicht, dass bei einer Kette von unterschiedlichen Sollabständen für die Lfz, welche aus dem Verkehrsstrom ohne TCP stammen, ein Wechsel auf das Target aus dem Verkehrsstrom mit TCP und damit ein Verfahrenswechsel bereits stattfinden kann, sobald das Trailing den Metering Fix passiert hat. Dies kann dann geschehen, wenn sich das neue Target bereits im Fächer befindet. Die Position des Trailing zum Zeitpunkt zu dem der Targetwechsel stattfindet, hängt vom Sollabstand ab. Je größer der Sollabstand, desto früher (weiter stromaufwärts) erfolgt der Targetwechsel. Dies wird aus Abb. 6.15 deutlich, in der die CTD-Fehler der

nicht über den TCP einfliegenden Lfz (schwarze Kurven) in Abständen von jeweils ca. 6nmi zueinander (unterschiedliche Standardsollabstände, $n \cdot 6.6\text{nmi}$ plus jeweiliger Fehler) auf Null abfallen. Der CTD Fehler kann ab dem Wechsel auf das hinzumergende Target nicht mehr berechnet werden. Für die Lfz die bereits ab dem Metering Fix das Target wechseln, ist demnach kein Graph sichtbar.

An jeweils gleicher Position (s. Abb 6.16) wird dann die dem PP/PPP-Verfahren entsprechende Geschwindigkeit kommandiert (schwarze Kurven), die bis zum Referenzpunkt (dem Schnittpunkt der Trajektorien) aufrecht erhalten wird.

Die Lage des Referenzpunktes kann aufgrund der Trackfehler im Fächer leicht variieren.

Dagegen weisen alle über den TCP einfliegenden Lfz erst im Abstand von genau 10nmi einen Geschwindigkeitssprung auf (max.15kts), weil dort der Wechsel auf das CTD-Verfahren stattfindet, das bis zum TCP aufrecht erhalten wird.

Wie Abbildung 6.17 zeigt, ergeben sich dadurch Geschwindigkeitsdifferenzen, die größer sind als die Differenzen in Abb 6.12 an gleicher Position. Die Höhe der Abweichung hängt davon ab, an welcher Stelle sich der TCP befindet und demnach davon, welche Strecke dem Trailing jeweils zum Ausgleich des Fehlers ab Erreichen des Metering Fix verbleibt. Steht mehr Strecke zur Verfügung, fällt die Geschwindigkeitsabweichung geringer aus. Die Position des TCP wurde hier in 20nmi Entfernung zum Metering Fix festgelegt.

Die Fehler, die sich im PP-Verfahren ergeben würden, wenn sich das Trailing am TCP befindet, zeigt Abb. 6.18. Diese sind 20nmi stromabwärts vom Metering Fix vollständig kompensiert. Bei der hier gewählten Distanz des TCP zum Metering Fix von 20nmi ergeben sich bei dieser Kombination von Fehler und Geschwindigkeitsdifferenz laut Abb 5.29 Trackabweichungen im Fächer von maximal 3° , womit die Randbedingung eingehalten ist.

Ab dem TCP hängt der Geschwindigkeitsverlauf der über den TCP einfliegenden Lfz vom Sollabstand ab. Für diejenigen Lfz deren Target sich bereits jenseits des Schnittpunktes der Trajektorien befindet, greift sofort das PPP-Verfahren, womit die Geschwindigkeit des Trailing bis zum Erreichen des jeweiligen Referenzpunktes konstant bleibt. Dies geschieht in der untersuchten Geometrie nur bei Sollabständen ab 360s. Da die Fehler aber bereits nahe Null sind entspricht die kommandierte Geschwindigkeit fast exakt der Referenzgeschwindigkeit.

6.3.4 Merging bei Winkeln von 180°

Beim Merging unter Winkeln von 180° ist für die Stabilität der Kette nur der Fall relevant, in dem ein einzelnes Lfz zum bestehenden Verkehrsstrom hinstößt und in diesem als Target dient. Hier soll untersucht werden, welchen Effekt Ungenauigkeiten des hinzumergenden Targets auf die Kette der nachfolgenden Lfz ausüben.

Je höher die erforderliche Geschwindigkeitsanpassung aufgrund des durch das hinstoßende Target verursachten zeitlichen Fehlers, desto kritischer der Effekt in der Kette.

Generell gilt, dass das Risiko für Instabilitäten mit abnehmendem Sollabstand ansteigt und umso gravierender ist, je später der Fehler detektiert wird, da dann entsprechend weniger Spielraum zur Kompensation zur Verfügung steht.

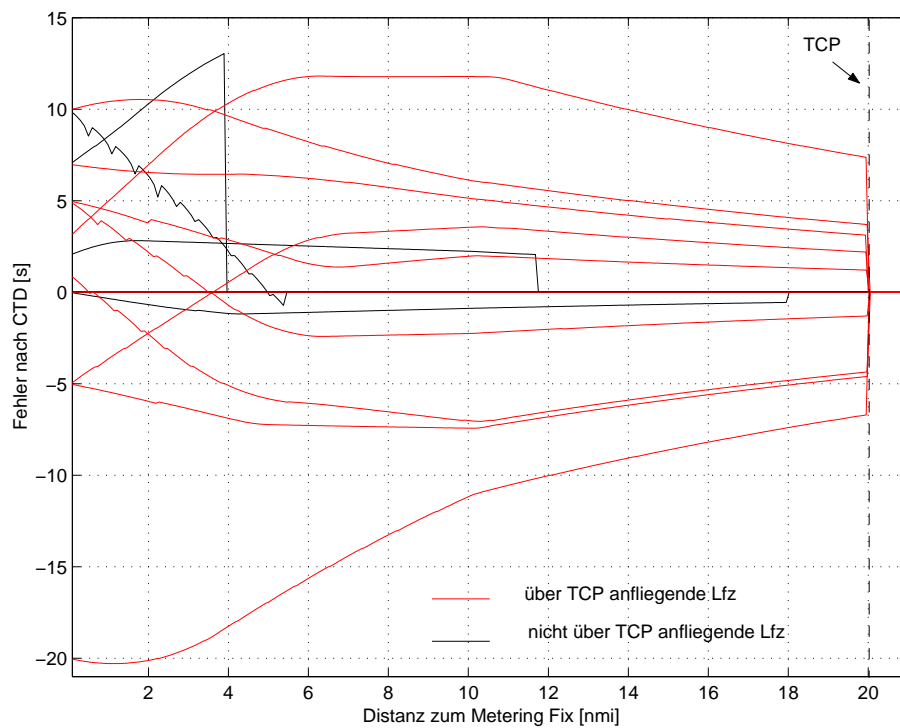


Abbildung 6.15: CTD-Fehler bei Wechsel von CTP auf MCTD nach 10nmi und variablen Sollabständen

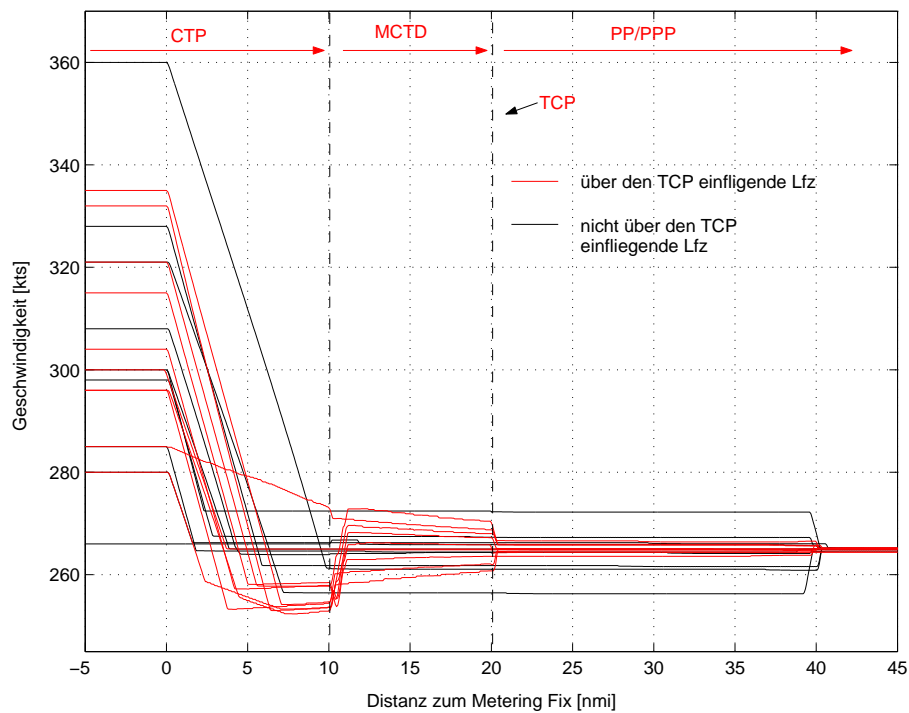


Abbildung 6.16: Geschwindigkeiten bei Wechsel von CTP auf MCTD nach 10nmi und variablen Sollabständen

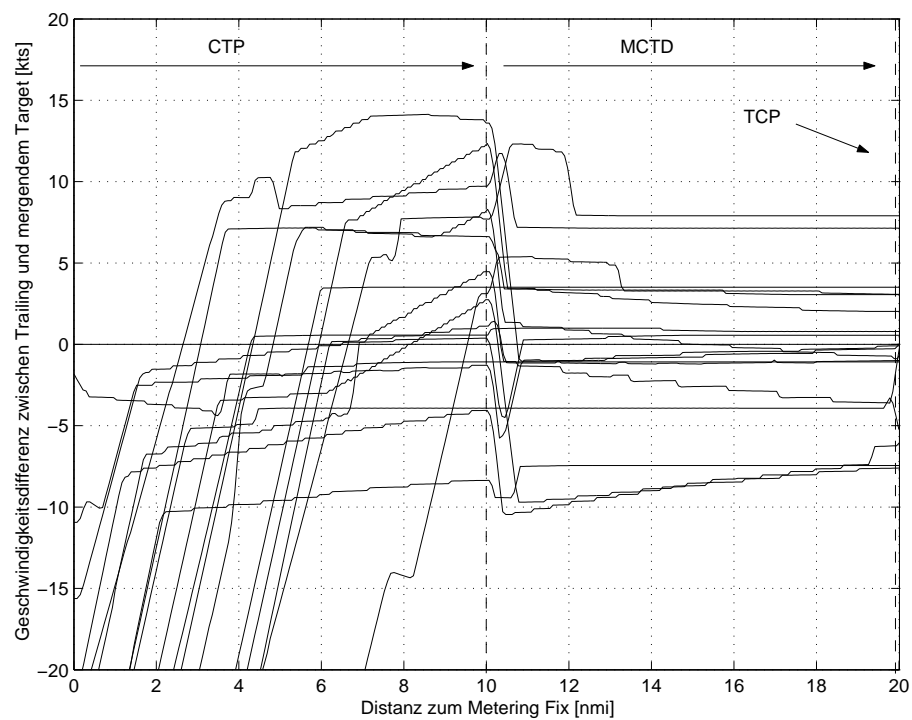


Abbildung 6.17: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Target und Trailing über der Position des Trailing bei variablen Sollabständen

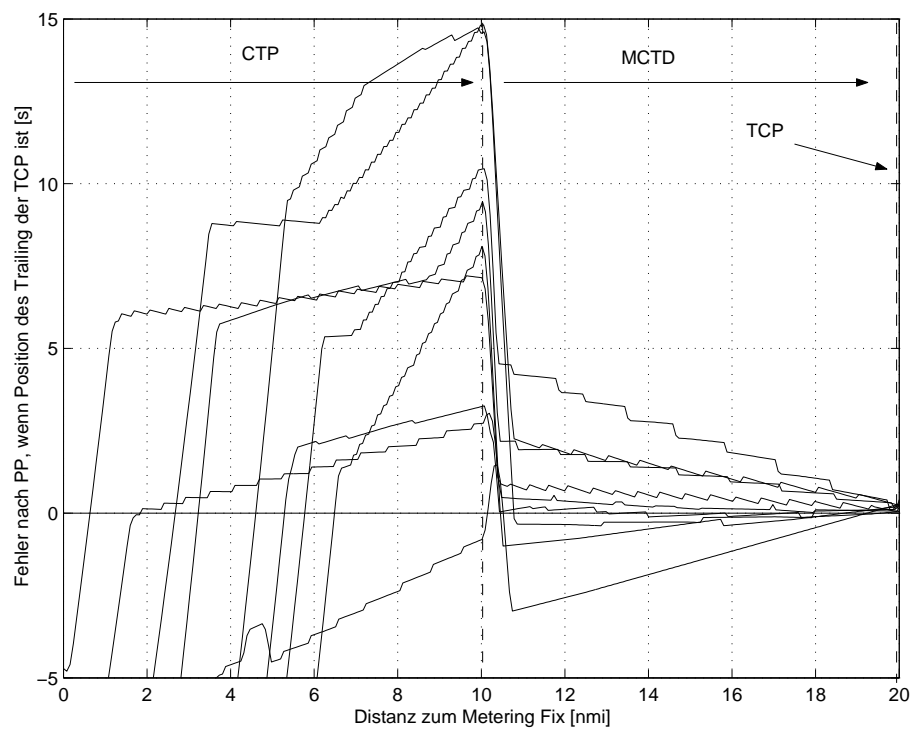


Abbildung 6.18: PP-Fehler bei Wechsel von CTP auf MCTD nach 10nmi und variablen Sollabständen

Die Zeitpunkte des Targetwechsels sind im Szenario mit und im Szenario ohne Targetübermittlung identisch. Der Targetwechsel findet statt, wenn das zuvor identifizierte Lfz den 180° Turn einleitet. Aufgrund der in Fall XIII beschriebenen Problematik bei zwei in der Sequenz aufeinanderfolgenden Lfz, die beide einen 180° Turn ausführen, darf die maximale Distanz der parallelen, entgegengerichteten Flugstreckenabschnitte im Fall ohne Targetübermittlung nur 4,5nmi betragen. Demnach wäre ein den Turn ausführendes Target 7nmi ($4,5/2 \cdot \pi$) vom Merging Point entfernt. Im Szenario bekannter Targets steht mehr Strecke zur Verfügung um den Fehler zu kompensieren. Das Szenario ohne Targetübermittlung stellt daher den Worst Case dar, der hier untersucht werden soll.

Die Fehlerkompensation ist für das Trailing am kritischsten, wenn das hinzumergende, den Turn ausführende Target zu spät ist, da sich die verbleibende Kompensationsstrecke damit weiter reduziert.

Es soll hier von einem durch den 180°-Turn verursachten Fehler von 5 Sekunden ausgegangen werden. Der Sollabstand des Trailing entspricht dem geringstmöglichen Abstand von 90s. Das Trailing befindet sich zum Zeitpunkt des Targetwechsels damit in 13,25nmi ($6,6+7-0,35$) Entfernung und der Zeitraum bis Erreichen des Merging Points beträgt 180 Sekunden. Um den Sollabstand von 90s wiederherzustellen darf das Trailing den Merging Point jedoch erst in $180+5=185$ Sekunden erreichen. Dazu ist es erforderlich, dass das Trailing in Reaktion auf den Fehler des Targets ab diesem Zeitpunkt eine Geschwindigkeit von 258 kts annimmt, seine Geschwindigkeit bis zum Erreichen den Merging Points also um 7 kts verringert und danach wieder auf die Referenzgeschwindigkeit von 265kts beschleunigt.

Um den Mergevorgang in einer Simulation abzubilden soll daher die Leadtrajektorie des ersten Trailing Aircraft nach dem die Störung verursachenden Lfz auf diese Art und Weise angepasst werden, um den Effekt auf die nachfolgende Kette von Lfz zu untersuchen.

Abbildung 6.19 und 6.20 zeigen die Geschwindigkeitsverläufe und MCTD-Fehlervläufe der Trailing Aircraft für ein Kette von 20 Lfz. Das erste Trailing folgt dem Target im Abstand von 90s und beginnt bei 50nmi auf die Störung durch das hinzumergenden Target zu reagieren. Alle weiteren Lfz folgen in zufälligen Abständen ($n \cdot \text{Standardlücke}$).

Wenn die nächsten unter 180° hinzumergenden Lfz keine Fehler mehr induzieren, folgen diese laut dem MCTD-Verfahren dem Geschwindigkeitsverlauf, der sich aufgrund der Störung ergeben hat (s. Abb. 6.19). Ereignen sich weitere Störungen, kann dies zu einem treppenartigen Verlauf der Geschwindigkeit führen, wobei jede Geschwindigkeitsänderung mit dem jeweiligen Fehler des hinzumergenden Lfz korrespondiert. Je größer der Sollabstand dabei ist, desto geringer fällt die Geschwindigkeitsänderung aus.

Große Sollabstände tragen auch auf andere Weise zur Wiederangleichung des Geschwindigkeitsverlaufes bei. Aufgrund eines vorangegangenen Targetwechsels kann der PP/PPP Referenzpunkt stromabwärts der von den vorausfliegenden Lfz durchgeführten Geschwindigkeitsanpassungen liegen. Damit wird ein Kopieren des Geschwindigkeitsverlaufes, wie in Abb.6.19 bei 60nmi zu erkennen, teilweise oder ganz übersprungen. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um wieder einen konstanten Geschwindigkeitsverlauf zu erreichen indem zwischen zwei Lfz ein sehr großer Sollabstand kommandiert wird.

Im ungünstigsten Fall treten für einige der Trailing Aircraft Geschwindigkeitsschwankungen auf, die der Geschwindigkeitsanpassung des ersten auf die Störung reagierenden

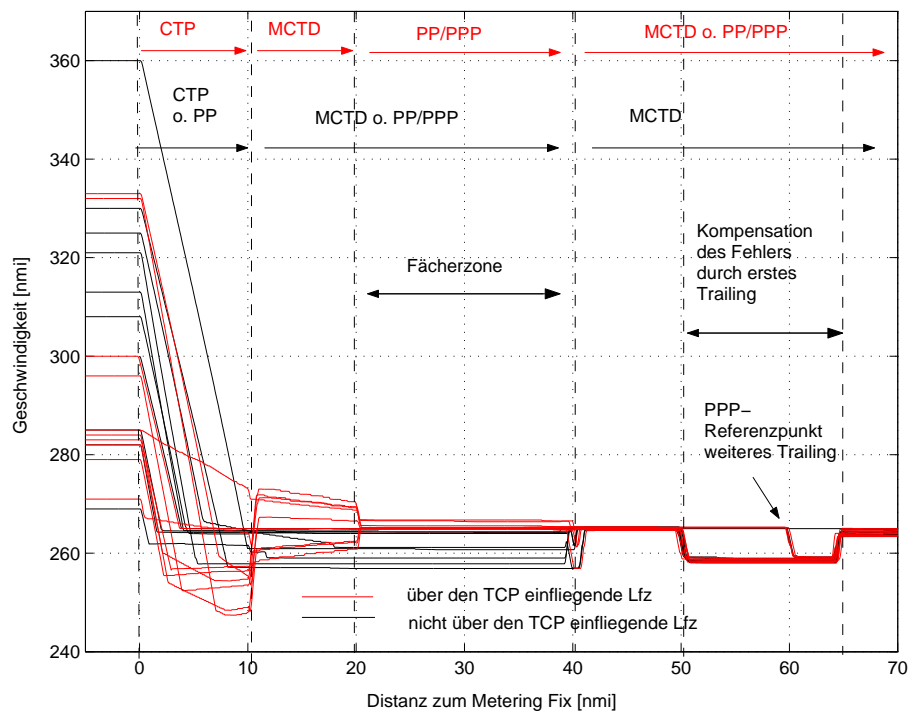


Abbildung 6.19: Geschwindigkeiten bei Störung durch unter 180° hinzumergendes Target (5s Fehler)

Lfz entsprechen. Diese beträgt hier 7kts, welche über ein Strecke von mehreren Meilen aufrechterhalten wird.

Fehler nach dem, für den Inter-Arrival Fehler relevanten, MCTD-Verfahren bauen sich wie in Abb. 6.20 zu sehen, nicht mehr auf.

Ist ein auf eine Störung reagierendes Lfz Target für ein über den TCP einfliegendes Trailing, kann es auch hier zu Abweichungen im Fächertrack kommen. Geschwindigkeitsabweichungen und PP-Fehler betragen bei Erreichen des TCP bis zu 8 Knoten und ca. 4 Sekunden. Die Fehler im Fächertrack betragen somit maximal ca. 3°. Die verursachten Störungen durch ein unter 180° hinzumergendes Lfz sind demnach bei 5 Sekunden Fehler nicht größer als beim Merging unter 0°-90°. Wie die Abbildungen zeigen, resultieren aus der Störung keinerlei Instabilitäten. Die MCTD Fehler bewegen sich auch unter Einfluss der Störung nahe Null.

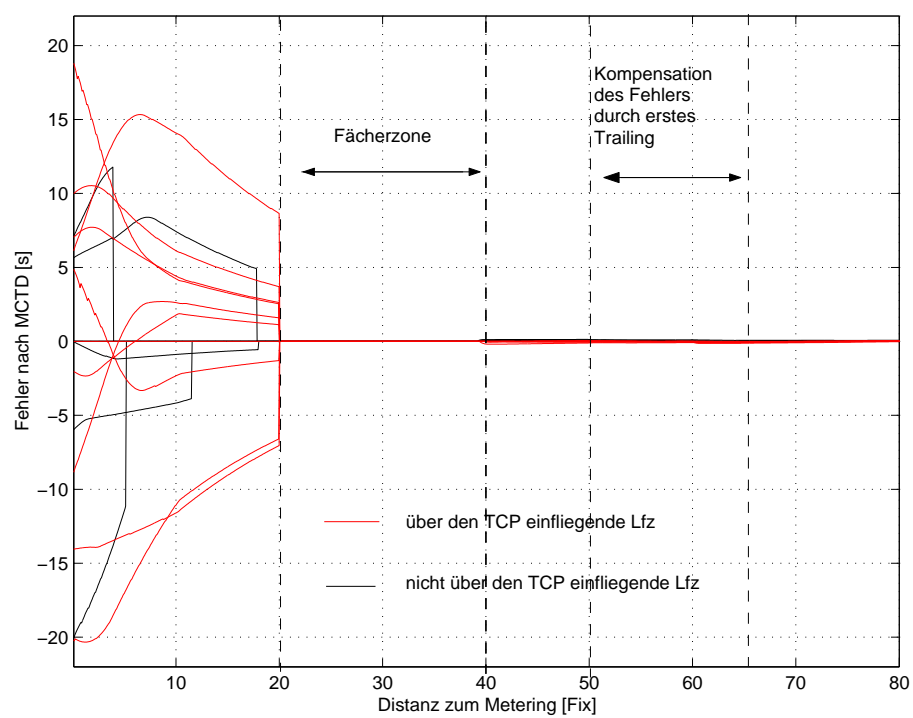


Abbildung 6.20: MCTD-Fehler bei Störung durch unter 180° hinzumergendes Target (5s Fehler)

Kapitel 7

Betriebskonzept

7.1 Ablauf aus Sicht eines Trailing Aircraft

Im vorliegenden Kapitel werden die Teilelemente der in Kapitel 5 beschriebenen einzelnen ASAS-Phasen, die bisher nur isoliert betrachtet wurden, auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 6 logisch zusammengefügt und in Flussdiagrammen dargestellt.

Es muss ein Gesamtablauf aus Sicht eines einzelnen Trailing Aircraft aufgestellt werden, der so generisch wie möglich ist. Das bedeutet auch, dass in Bezug auf die Abfolge der Regelungsverfahren möglichst jeder Mergevorgang gleich ist. Ebenso muss im Szenario ohne Targetübermittlung die Suche nach dem Target immer dem gleichen Muster folgen, da nicht von vornherein bekannt ist, ob das nächstfolgende Target unter 0° - 90° oder 180° hinstößt oder weiterhin erhalten bleibt. Die Targetsuche muss ein kontinuierlicher Vorgang sein, da die Möglichkeit bestehen muss, ein neues Target jederzeit zu aktivieren, sobald die Wechselbedingungen erfüllt sind. Es wurde darauf geachtet, dass nur Wechselbedingungen gelten, die auch vom Trailing Aircraft selbst identifiziert werden können und keine Daten benötigt werden, die dem Lfz nicht direkt zur Verfügung stehen.

Ab dem Zeitpunkt des Targetwechsels wird mit Ausnahme der Phase des Mergings am Metering Fix immer ein PP-Verfahren initiiert. Hat das Target den Schnittpunkt überflogen, wird auf ein PPP-Verfahren gewechselt. Befindet sich das Target beim Targetwechsel bereits wieder auf derselben Trajektorie wie das Trailing (nur möglich bei Trailing über TCP, Abbildung), ist das Merging bereits abgeschlossen. Es folgt dann direkt ein PPP-Verfahren auf den Punkt, an dem sich das Target zum Wechselzeitpunkt befunden hat. Hat das Trailing diesen Punkt erreicht, wird die Regelung mit einem CTD-Verfahren fortgesetzt.

Es muss im Vorgehen eine generelle Unterscheidung zwischen einem Szenario mit Targetübermittlung und einem Szenario ohne Targetübermittlung stattfinden. Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen den Ablauf für beide Szenarien.

Innerhalb der Flussdiagramme wird jeweils auf das Verfahren in den Teilphasen referenziert. Die Flussdiagramme für die Verfahren in den Teilphasen finden sich in Anhang F.

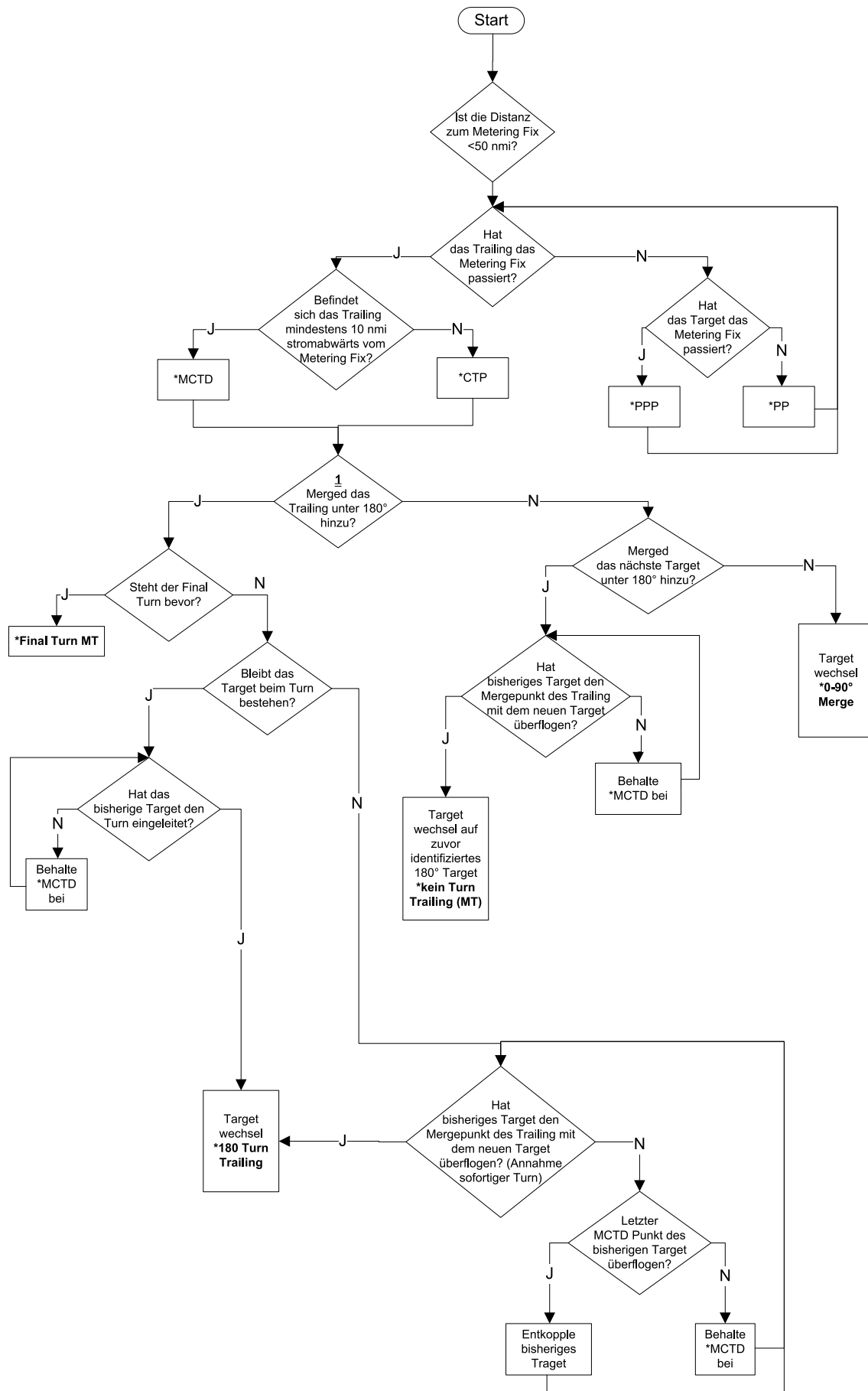


Abbildung 7.1: Gesamtablauf für Trailing Aircraft im Szenario mit bekannten Targets

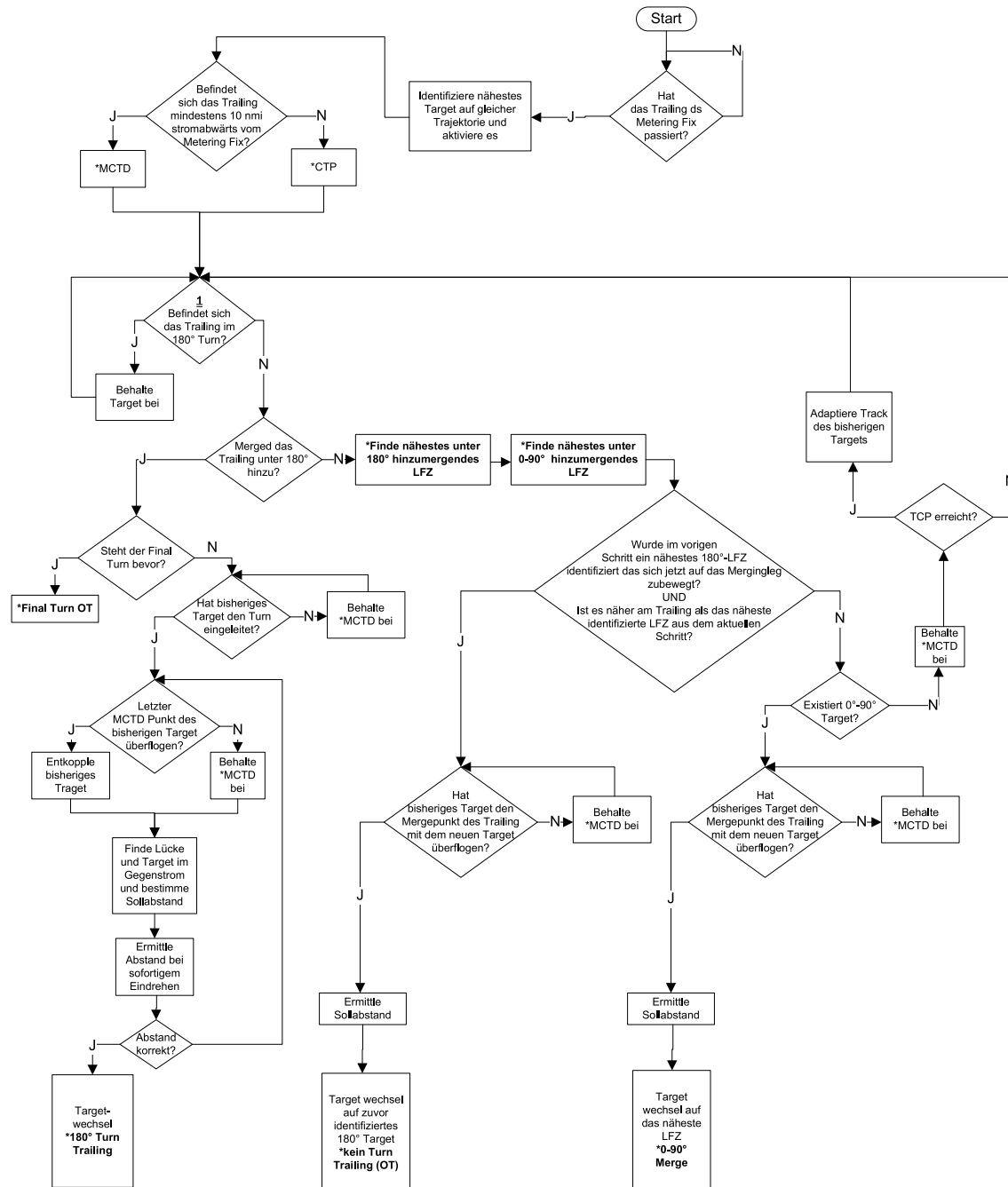


Abbildung 7.2: Gesamtablauf für das Trailing Aircraft im Szenario mit nicht übermittelten Targets

7.2 Initialisierung

Die Initialisierung des ASAS-Verfahrens beginnt mit der Ankunft des ersten Lfz im Verkehrsstrom am Metering Fix. Das Verhalten der ersten Lfz muss so genau wie möglich der vom Arrival Manager zur Zielzeitenberechnung benutzten Referenztrajektorie entsprechen. Das bedeutet, dass diese Lfz bei Erreichen des Einflughauptes eine Geschwindigkeit von 300kts GS aufweisen sollten und sofort mit der Verzögerung auf die prozedurale Anfluggeschwindigkeit von 265kts beginnen müssen.

Um Verschiebungen in den Anflugströmen und somit Abweichungen von den Sollabständen von vornherein zu vermeiden, ist es erforderlich für die Initiierung möglichst identische und träge Lfz zu wählen.

Da für das allererste Lfz der Sequenz bei Einleitung des Final Turns kein Target besteht, muss es die Anweisung für das Eindrehen auf das Final auf konventionelle Art und Weise erhalten.

Existiert in der Anflugsequenz keine Abfolge von Lfz, die den oben genannten Forderungen entspricht, besteht als Alternative die Einführung von aufeinander abgestimmten Ghostleads. Hierbei werden die Trajektorien von virtuellen Lfz simuliert die sich exakt so verhalten, dass die initiale Zusammenführung der Verkehrsströme fehlerfrei erfüllt wird. Die simulierten Trajektorien müssen in Form von ASAS-Daten an das jeweilige erste Trailing Aircraft eines Verkehrsstromes übertragen werden.

7.3 Planung

Um einen reibungslosen Ablauf des Verkehrsflusses in die TMA bis zur Landung zu gewährleisten ist es erforderlich, dass die Lfz die Zielzeiten bei Anflug auf das Metering Fix genau einhalten. Diese Zielzeiten werden vom Arrival Manager geplant. Die finale Sequenz der Lfz muss dabei in Abhängigkeit der Steuerbarkeitsfenster der einzelnen Lfz berechnet werden.

Es besteht im Prinzip kein Unterschied zum heute bereits angewendeten Vorgehen. Allerdings stellt ein größerer Planungshorizont des AMAN die Einhaltung von Vielfachen der Sollabstände sicher ohne dass Holdings erforderlich werden.

Ein zu hoher Zufluss an ankommendem Verkehr wird entweder durch die Vergabe von Startslots am Vorflughafen erreicht oder in Zukunft durch die Vergabe von Target Times of Arrival (TTAs), die dem Luftraumnutzer mehr Flexibilität bei der Trajektoriengestaltung geben.

Sind Holdings nicht vermeidbar, kann auch im Szenario mit Targetübermittlung das ASAS-Verfahren erst bei Überflug des Target über das Metering Fix begonnen werden, da vorher kein Ankunftszeitpunkt des Target am Metering Fix präzisiert werden kann.

In den in der Simulation untersuchten Szenarien wurde davon ausgegangen, dass die Routenstruktur ein Leg mit variablem Track vorsieht, mit dem die Lärmbelastung kontrolliert und variiert werden kann.

Jede Änderung des vorgesehenen Tracks innerhalb des Lärmfächers erfordert eine Verschiebung der zwei mergenden Verkehrsströme gegeneinander. Somit wird ein gewollter Fehler zwischen einer Paarung von Target und Trailing Aircraft eingeführt, der bei Erreichen des Targetwechsellpunktes durch die zugelassenen Trackänderung kompensiert wird. Alle folgenden Lfz reagieren dann automatisch auf die selbe Weise, bis eine erneute Verschiebung der Verkehrsströme erfolgt.

Die Änderung des Tracks muss mit einiger Vorlaufzeit in die Sequenz des AMAN eingeplant werden. Das bedeutet, dass die Zielzeiten des ersten Lfz mit verändertem Track und alle ihm folgenden Lfz entsprechend angepasst werden müssen, solange ihre Steuerbarkeitsfenster dies erlauben.

7.4 Rollen

7.4.1 Lotsen

Da davon ausgegangen wird, dass der Erfassungshorizont des AMAN in einer ASAS-Umgebung gegenüber heute erweitert sein wird, erstreckt sich auch die Vergabe von Zielzeiten bis in die Kontroll-Sektoren der Center-Lotsen die dort für die Zuweisung und Einhaltung der abgeleiteten Zielzeiten an den Sektorgrenzen sorgen müssen.

Die Aufgabe des Approachlotsen besteht in einer ASAS-Umgebung darin, den Zufluss des Verkehrs in die TMA und damit die Einhaltung der Zielzeiten am Metering Fix zu überwachen. Können die zuvor vom Arrival Manager vergebenen Zielzeiten nicht eingehalten werden und sind die Lfz zu früh, muss der Approachlotse eine Holdinganweisung geben.

Die Pickup-Lotsen, die den Verkehr von außerhalb der TMA übernehmen, werden bei der Anwendung von ASAS-Verfahren in der TMA von der Aufgabe der Geschwindigkeits- und Vectoring-Anweisungen an einzelne Lfz entbunden. Die TMA wird aufgrund der räumlichen Begrenztheit immer eine ASEP Umgebung (vgl. Abschnitt 3.1) bleiben, womit die Verantwortlichkeit für die letztendliche Überwachung und Einhaltung der erforderlichen Mindestseparation beim Lotsen verbleibt. Allerdings verschieben sich bei der Anwendung des betrachteten ASAS-Verfahrens die Tätigkeiten mehr in Richtung eines reinen Monitorings. Ein aktives Eingreifen ist nur noch in nicht nominalen Situationen erforderlich.

Falls die Zuweisung des finalen Sollabstandes nicht durch automatisierte Übertragung durch den AMAN erfolgt, sind die Feeder-Lotsen in Zukunft für die Zuweisung der endgültigen Sollabstände zuständig. Die Anweisungen zum Eindrehen der Lfz auf das Final entfallen.

Wie in Abschnitt 5.4.14 im Szenario ohne Targetübermittlung beschrieben, kann es durch die falsche Nutzung von Lücken beim 180° Turn dazu kommen, dass sich vor dem Turn auf das Final zwei Lfz auf gleicher Höhe befinden.

Das Konzept sieht zwar eine eindeutige Regelung zur Klärung des Vorrangs vor, jedoch handelt es sich hier um eine extrem sicherheitskritische Situation. Leiten beide Lfz den Turn zu gleicher Zeit ein, existiert praktisch kein Ausweichmanöver, mit dem eine Kollision sicher verhindert werden kann. Aus diesem Grund wird es in Zukunft in der Verant-

wortung des Feeder-Lotsen liegen, die Rangfolge zu bestimmen und den konkurrierenden Lfz ihr jeweiliges Target zuzuweisen.

7.4.2 Piloten

An Bord der Lfz ist der Ablauf bei Anwendung des ASAS-Verfahrens weitgehend automatisiert.

Bei Erhalt der Zielzeit für das Metering Fix ist das FMS durch die Eingabe einer CTA so zu programmieren, dass die Zielzeit eingehalten wird.

Bei Erreichen eines Targetwechsellpunktes ist die Situation vor Aktivierung einem Plausibilitätscheck in Bezug auf Target und vorgegebenem Sollabstand zu unterziehen. Die Aktivierung des Target sollte in jedem Fall manuell bestätigt werden. Allerdings liegen in bestimmten Situationen der Identifizierungszeitpunkt des neuen Target und der erforderliche Aktivierungszeitpunkt nahe beieinander, sodass eine manuelle Bestätigung zeitkritisch und nur sinnvoll ist, wenn die Arbeitslast der Piloten in dieser Phase nicht zu hoch ist. Durch den Wegfall der Beachtung des Funkverkehrs und des Befolgens von Vectoring- und Geschwindigkeitsanweisungen wird davon ausgegangen, dass ein entsprechender Ausgleich geschaffen ist. Dies ist durch entsprechende Validierungen zu bestätigen.

Vor Einleitung des Final Turns muss zusätzlich der Sollabstand zum endgültigen Target eingegeben werden.

7.5 Spezielle Situationen

7.5.1 Betriebsrichtungswechsel

Steht ein Betriebsrichtungswechsel bevor, müssen alle betroffenen Lfz innerhalb und außerhalb der TMA über den Wechsel informiert werden. Dies kann automatisiert geschehen. Die Änderung der Route sollte an Bord vom Piloten bestätigt werden.

Ein Betriebsrichtungswechsel kündigt sich in der Regel über einen längeren Zeitraum an, da Windrichtungswechsel nicht plötzlich auftreten. So bleibt ausreichend Zeit einen Punkt in der AMAN Sequenz festzulegen, ab dem die Kette der Lfz die Zielzeiten am Metering Fix erfüllen muss, die an die Routenstruktur der anderen Betriebsrichtung angepasst sind.

Im Szenario mit Targetübermittlung kann ein Betriebsrichtungswechsel bei geringer Vorlaufzeit auch innerhalb der TMA realisiert werden. Dazu bricht der verantwortliche Lotse die Ketten innerhalb der TMA auf. Das erste Lfz jedes Verkehrsstromes, das in neuer Betriebsrichtung landet, erhält dann konventionelle Vectoring-Anweisungen und wird entlang der neuen Route geführt. Der AMAN muss zeitgleich die Sequenz sowie die Sollabstände anpassen und die neue Targetabfolge erneut an alle Lfz versenden.

Ein kurzfristiger Betriebsrichtungswechsel ist im Szenario ohne Targetübermittlung nicht möglich, da die vorgesehenen Sollabstände durch nicht vermeidbare Verschiebungen der Anflugströme gegeneinander nicht mehr eindeutig identifiziert werden können.

Sollte dies erforderlich sein kann das ASAS-Verfahren jederzeit abgebrochen und zum herkömmlichen Verfahren zurückgekehrt werden, bevor das ASAS-Verfahren für eine andere Betriebsrichtung neu initiiert wird.

7.5.2 Missed Approach

Ein Missed Approach wird entlang einer dedizierten Route zu einem Punkt zurückgeführt ab dem die Eingliederung in den Anflugstrom wieder möglich ist. Bei nicht vollständig ausgenutzter Anflugkapazität kann das Lfz in eine Lücke gevectored werden. Bei übermittelten Targets erfolgt ein Update der Anflugsequenz und Sollabstandsberechnung der drei beteiligten Lfz.

Bei hoher Verkehrslast kann das Lfz erst am Ende der Thrombone in den Downwind eingegliedert werden. Die Transition verlängert sich dadurch für alle folgenden Lfz. Die Sequenz wird dadurch gestört und kann nur durch Vergabe und Einhaltung neuer Zielzeiten der nachfolgenden Lfz am Metering Fix wieder vollständig kompensiert werden.

Ein sofortiges Update der Zielzeiten eines der Verkehrsströme am Metering Fix und „Ausbremsen“ der Kette stellt keine Alternative dar, da die Kette nur durch Holdings aufgehalten werden könnte. Ein Holding beträgt jedoch drei Minuten. Dies ist mehr als zur Eingliederung eines zusätzlich Lfz in den Verkehrsstrom nötig wäre und würde unerwünschte Verzögerung verursachen.

7.5.3 Entfernen eines Lfz aus der Kette

Ein Lfz welches sich nicht konform zu seinen ASAS-Anweisungen verhält muss durch Vectoring manuell aus der Kette entfernt werden. Bei übermittelten Targets erfolgt ein Sequenz und Sollzeitenupdate für das bisherige Trailing Aircraft. Im Szenario nicht übermittelter Targets wird die Veränderung automatisch detektiert.

Das aus der Kette entfernte Lfz kann in niedriger Verkehrslast auch aus Gründen der kurzfristigen Priorisierung aus der Kette entfernt werden.

Die Wiedereingliederung erfolgt wie in Abschnitt 7.5.2 beschrieben.

7.5.4 Integration nichtausgerüsteter Lfz

Nicht ausgerüstete Lfz müssen in der Planung des AMAN zwar berücksichtigt werden, sollen im Szenario übermittelter Targets in der Berechnung der Targetabfolge für das betreffende Trailing aber übersprungen werden. Für das Trailing fungiert in diesem Fall das dem nichtausgerüsteten Lfz voausfliegende Lfz als Target. Die Pickup- und Feeder-Lotsen haben nun die Aufgabe das nichtausgerüstete Lfz durch Vectoring- und Geschwindigkeitsanweisungen in der für es vorgesehenen „Lücke“ zu halten (konventionelle Vorgehensweise).

Im Szenario übermittelter Targets würde das nichtausgerüstete Lfz automatisch als Target identifiziert. Um durch nicht störungsfreies Verhalten des nichtausgerüsteten Lfz ein

Verschieben der Anflugströme gegeneinander zu vermeiden, muss zusätzlich eine Funktionalität vorgesehen werden, mit der im ASASVerfahren identifizierte Targets ignoriert werden können. Somit ist das gleiche Vorgehen wie im Szenario mit Targetübermittlung möglich.

Auch dieses Verfahren stellt nicht die Nominalsituation dar, da der Ausrüstungsgrad mit ADS-B zum erwarteten Zeitpunkt einer Realisierung des vorliegenden Konzeptes mit über 90% angenommen wird.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendbarkeit der etablierten ASAS-Verfahren „Merge Behind“ und „Remain Behind“ für die Erstellung und Umsetzung eines integrierten Anflugkonzeptes auf Basis relativer Flugführung mittels ADS-B im Flughafennahbereich im ASPA Delegationskontext untersucht.

Die Motivation einer solchen Untersuchung liegt einerseits darin, dass durch einen automatisierten Gesamtablauf der Verkehrsführung in der TMA die Arbeitsbelastung der Lotsen und Piloten reduziert werden kann, die in der Phase des Anflugs die höchste im gesamten Flugablauf ist.

Andererseits besteht durch die gegenüber einer manuellen Führung des Lfz präzisere automatische Ausführung der Separationsaufgabe die Erwartung, dass in die Separationsplanung integrierte Sicherheitspuffer reduziert werden können und somit ein Beitrag zur Kapazitätssteigerung geleistet wird.

Es erfolgte zunächst eine Analyse bereits durchgeführter Simulationen und Flugversuche in der TMA. Diese ergab, dass die Herstellung von Lfz-Ketten während diese etabliert sind, zu einer deutlichen Entlastung von Lotsen und Piloten führte, jedoch an verschiedenen Stellen im Flughafennahbereich diese Ketten aufgelöst und neu gebildet werden mussten, was den Nutzen verringerte, beziehungsweise insgesamt zu einer nicht tolerierbaren Erhöhung der Arbeitsbelastung führte.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ergaben, dass der Grund hierfür im Fehlen eines durchgängigen Konzeptes für die nahtlose Anwendung von ASAS-Verfahren vom Einflug in die TMA bis hin zum stabilisierten Final Approach zu suchen ist.

Die vorliegende Arbeit sollte deshalb ein solches Konzept erstellen und eine mögliche Umsetzung aufzeigen.

Hierfür wurden in Kapitel 5 zunächst für die einzelnen Anflugphasen Teilkonzepte zur Anwendung von ASAS-Verfahren bei verschiedenen Rahmenbedingungen erstellt und Targetwechselbedingungen abgeleitet. Als Hauptunterscheidungsmerkmal in den jeweiligen Phasen diene dabei die Kenntnis oder Unkenntnis der Folge der dem jeweiligen Trailing Aircraft zugeordneten Target Lfz. Als weiteres Unterscheidungsmerkmal diene die Existenz in der Anflugprozedur festgeschriebener Mergingpunkte.

In Kapitel 6 erfolgte dann die Simulation der relevanten Teilphasen, mit den sich jeweils aus der vorherigen Phase ergebenden einzuhaltenden Randbedingungen, bis daraus

in Kapitel 7 schließlich für die Szenarien mit und ohne Targetübermittlung jeweils ein einheitlicher übergreifender Konzeptablauf erstellt wurde.

Da die Szenarien mit festen Mergepunkten keine automatisierte Anflugroutenmodifikation zur Minderung der lokalen Umweltbelastung zulassen, wurden in der Simulation nur Szenarien ohne feste Mergepunkte untersucht.

Voraussetzung für eine mögliche Kapazitätssteigerung durch reduzierte Planungspuffer ist, dass in einer langen Kette von Lfz durch ein integriertes Konzept keine Instabilitäten aufgrund des angewendeten Regelungsverfahrens entstehen.

Aus diesem Grund fokussierte sich die vorliegende Arbeit in Kapitel 4 auch auf die Untersuchung der möglichen Regelungsverfahren und deren Eigenschaften bei der Anwendung in Ketten von 100 Lfz.

Aus der Literatur sind nur Verfahren bekannt, bei denen eine stark stromaufwärts oder stromabwärts gerichtete Geschwindigkeitspropagation auftritt (CTP und CTD). Daher wurde in Abschnitt 4.3.2 eine alternative Regelungsmethode (MCTD) entwickelt, die diese Effekte minimiert.

Mit der vorliegenden Arbeit sollte die Frage beantwortet werden, ob und unter welchen Randbedingungen oder mit welchen Anpassungen ein durchgängiges ASAS-Verfahren mit den heute gängigen RNAV Anflugprozeduren in der TMA vereinbar ist. Als Beispiel diene der Flughafen Frankfurt. Die Elemente der Anfluggeometrien sind jedoch generisch und lassen sich auf jeden Flughafen anwenden.

Um bei einem vollautomatischen Verfahren ohne Führungsanweisungen durch den Lotsen die Flexibilität bei der Minimierung lokaler Umweltbelastungen durch laterale Streuung zu erhalten, wurde in Abschnitt 5.4.10 das Konzept des Trackfächers eingeführt.

Der Trackfächer ist ein festgelegter Bereich, in dem ausgehend von einem Trajectory Change Point das Routing eines einzelnen Verkehrsstroms in einem bestimmten Winkelbereich variiert werden kann, bis dieser Routenabschnitt auf das anschließende Leg trifft.

Da keine direkten Führungsanweisungen gegeben werden, muss jedes Trailing Aircraft, sobald es den TCP erreicht, selbst entscheiden, welchen Track es einschlagen soll. Der in der Planung vorgesehene Track kann durch die Vergabe von Zielzeiten am Metering Fix bei Beginn des ASAS-Verfahrens und durch bestimmte Vorschriften zur Regelung am TCP gesteuert werden. Durch die zeitliche Verschiebung zweier Verkehrsströme zueinander muss innerhalb des Trackfächers dann ein anderer Track als der Standardtrack gewählt werden, um den beabsichtigten Sollabstand aufrechtzuerhalten.

Die Genauigkeit der Einhaltung des geplanten Tracks steht im Zusammenhang mit dem Verhalten der Lfz-Kette bis zum Merging an dieser Stelle, was wiederum die Geometrie des Fächers bestimmt.

In Kapitel 5, Abschnitt 5.4.10 erfolgte daher für das Szenario mit Targetübermittlung die Identifizierung der Randbedingungen für die Einhaltung bestimmter Fehlertoleranzen bei vorliegender Geometrie. Abschnitt 5.4.12 legte weitere Einschränkungen im Winkelbereich fest, sodass im Szenario ohne Targetübermittlung die Identifikation von Target und Sollabstand gewährleistet ist.

In Kapitel 6 wurde dann mittels der Simulation analysiert, wie diese Randbedingungen erfüllt werden können, woraus sich die anzuwendenden Regelungsverfahren sowie eine Mindestwegstrecke stromaufwärts des TCP ergaben. Diese Mindestwegstrecke stellt wiederum eine einzuhaltende Randbedingung für die Gestaltung der TMA bzw. der Lage der Einflugfixe dar, die eingehalten werden muss, falls ein Trackfächer zur Anwendung kommen soll.

Die Simulation hat gezeigt, dass an den Einflugpunkten keine Festschreibung eines erlaubten Geschwindigkeitsbereiches und damit auch keine maximale Geschwindigkeitsdifferenz für die Initiierung des ASAS-Verfahrens erforderlich ist, so wie es in den Untersuchungen zu ASAS in der Vergangenheit stets der Fall war. Selbst bei sehr hohen oder sehr niedrigen Geschwindigkeiten und den an der TMA Grenze auftreten Fehlern von $\pm 10s$ kann der Fehler innerhalb ca. 20nmi soweit kompensiert werden, dass die Einhaltung der Randbedingungen für das Merging, vor allem bei der Verwendung eines Lärmfächers am TCP, gewährleistet ist und eine Angleichung der Geschwindigkeiten durch das Regelungsverfahren stattgefunden hat. Die notwendige Distanz ist damit nicht länger als die Entfernung der heutigen Lage der Zonen erforderlicher Lärmstreuung zur Position der Einflugpunkte. Damit kann die TMA Grenze an gleicher Stelle verbleiben und muss nicht in größere Entfernung zum Flughafen verlegt werden.

Da wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben, auch im Szenario mit Targetübermittlung, in dem das Merging vor dem Metering Fix beginnt, in einzelnen Fällen noch Fehler in der Größenordnung des Szenarios mit Targetübermittlung auftreten können, besteht zwischen den beiden Fällen an diese Stelle kein Unterschied.

Die Simulation ergab, dass sich für die erste Intrail-Phase nach Passieren des Einflugpunktes eine Abfolge der Regelungsverfahren mit einem Wechsel von CTP auf MCTD nach 10nmi zurückgelegter Strecke am besten eignet. Es traten hier keine destabilisierenden Effekte oder Separationsunterschreitungen auf und auch die Geschwindigkeitsschwankungen der Trailing Aircraft fielen bei dieser Abfolge am geringsten aus.

Um ein Mergeverfahren nicht an zu viele von der Anflugphase abhängige Bedingungen zu knüpfen, muss der Mergevorgang möglichst generisch sein. Die Überlegungen zur Verknüpfung der Teilphasen und die Simulationsergebnisse haben dazu geführt, dass, wenn das Target bei der Initialisierung den Mergepunkt noch nicht passiert hat, stets zunächst ein PP-Verfahren zur Anwendung kommt und auf das PPP Verfahren gewechselt wird, sobald das Target den Mergepunkt erreicht hat. Erfolgt der Targetwechsel erst, wenn sich neues Target und Trailing bereits intrail befinden, muss auch hier das PPP-Verfahren angewendet werden.

Zur Identifizierung des bevorstehenden ASAS-Manövers wurden in Kapitel 7 entsprechende Flussdiagramme aufgestellt.

In der Simulation wurde gezeigt, dass die angewendeten Abfolge von ASAS-Regelungsverfahren sowohl für das Merging unter 0° - 90° als auch bei Störungen durch Ungenauigkeiten eines Targets bei einem 180° Turn geeignet ist.

Für die Anwendung von ASAS kommen nur Area Navigation Procedures in Frage. Bei diesen ist die eigene laterale Trajektorie innerhalb der TMA auf Basis von Wegpunkten genau festgelegt. Ausnahmen bilden hier nur offene Legs in den Transitions, die unterschiedlich lang ausfallen können, wobei der Turn an keinen festen Wegpunkt geknüpft ist.

Da in beiden Szenarien ohne fest vorgegebene Mergepunkte gearbeitet wird, sind die Schnittpunkte der momentanen Trajektorien als Referenzpunkte anzusehen. In Bezug auf die Gestaltung der Routengeometrie gilt beim Merging unter 0° - 90° daher die Beachtung der Lage und Orientierung der Legs zur Vermeidung von Targetfehlidentifikationen. Hierzu muss jedem Leg eine linksseitige oder rechtsseitige Cross Track Distanz zugeordnet sein, ab der eine Targetinitiierung stattfinden darf.

In Zukunft müssen, um ASAS in Kombination mit einem Trackfächer anwenden zu können, Trajectory Change Points in die die RNAV Procedure eingeführt werden, die den Ausgangspunkt des Fächers beschreiben. Zur Vermeidung der Entkopplung des Regelungsverfahrens bei Eintritt des Targets in den Fächer wird auch die Festlegung des Endpunktes des TCP Legs und damit des Bereiches in dem eine große Cross Track Error erlaubt ist, erforderlich.

Um die Abweichungen vom geplanten Track im Fächer zu minimieren ist es nötig, dass in der Anflugprozedur eine Referenzgeschwindigkeit hinterlegt ist, die für die Berechnung der Zielzeiten für die Zusammenführung der Verkehrsströme vom Arrival Manager verwendet wurde. Wie in Abschnitt 5.4.10 beschrieben, soll in bestimmten Fällen bei der Berechnung des erforderlichen Tracks im Fächer eine Anpassung der Geschwindigkeit des Trailing auf die Referenzgeschwindigkeit stattfinden.

Existiert zum Zeitpunkt der Erfüllung der Targetwechselbedingungen kein voriges Intrail-Target, muss aus der Anflugprozedur hervorgehen, dass ab dem Metering Fix eine Rücknahme der Geschwindigkeit auf die Referenzgeschwindigkeit vorzusehen ist, um ein Anwachsen des Fehlers zu vermeiden.

In beiden Szenarien gilt beim 180° Turn jeweils ein Maximalabstand für die entgegengesetzt parallelen Legs, damit die Aktivierung des jeweiligen Targets korrekt von statten gehen kann.

In der Anflugprozedur für das Merging unter 180° im Szenario ohne Targetübermittlung muss auf den Legs vor einem Turn mittels separater Wegpunkte zudem ein Bereich festgelegt sein, in dem der Turn und damit die Nutzung von Lücken im Gegenanflug gestattet ist (vgl. 5.4.14).

Es wurde gezeigt, dass in beiden Szenarien die Flexibilität in der Gestaltung der Anflugroutengeometrie durch die Verwendung eines Lärmfächers bei der Anwendung des ASAS-Verfahrens erhalten bleibt. Auch wenn der Spielraum in der Winkelvariation innerhalb des Fächers im Fall ohne Targets geringer ist, kann die Route im Tagesverlauf beliebig oft verändert werden, ohne dass dafür spezielle Wegpunkte veröffentlicht werden müssten.

Bei der hier angewendeten abschnittswisen Simulation konnten in einer zufälligen Kette von 20 Lfz gängiger Lfz-Muster, die jeweils durch ein möglichst träges Lfz initiiert wurde, keine destabilisierenden Effekte festgestellt werden.

Somit lautet die Schlussfolgerung, dass das vorgestellte durchgängige Konzept auf Basis einer kontinuierlichen Abfolge von ASAS-Manövern in einer langen Kette von Lfz im Flughafennahbereich Anwendung finden kann, ohne dass unkontrollierbare Effekte auftreten, die die Wiederauflösung der Ketten nach sich ziehen. Dies gilt sowohl für ein Szenario mit, als auch ein Szenario ohne Targetübermittlung.

Beide Konzeptstränge sind für eine vollautomatische Umsetzung geeignet. Eine Reduzierung der Arbeitsbelastung ist daher implizit und muss nicht nachgewiesen werden, da

die Teilaufgabe der Flugführung in der Nominalsituation für den Lotsen gänzlich entfällt und, obwohl die Verantwortung für das Einhalten der Separation weiterhin beim Lotsen verbleibt, nur noch ein Monitoring des Verkehrs erforderlich ist.

Die Ergebnisse liefern somit den indirekten Nachweis, dass der erwartete Nutzen in Bezug auf Reduzierung der Arbeitsbelastung und Steigerung der Kapazität realisierbar ist. Umfangreichere Schnellzeit- sowie Realzeitsimulationen müssen das in Zukunft bestätigen.

In Anbetracht der sehr konservativen Natur des Luftverkehrssystems und der, trotz nachweislichem prozeduralem wie monetärem Nutzen, immer noch anhaltenden Skepsis gegenüber Automation an Bord wie auf dem Boden, ist mit einer operativen Umsetzung eines solchen integrierten ASAS-Verfahrens für die TMA jedoch frühestens in einigen Jahrzehnten zu rechnen.

Anhang

Anhang A

ASTERIX CAT 21 Daten

Data Item Ref.Nr.	Beschreibung	Auflösung
021/010	Data Source Identification	N.A.
I021/020	Emitter Category	N.A.
I021/030	Time of Day	1/128 s
I021/032	Time of Day	1/256 s
I021/040	Target Report Descriptor	N.A.
I021/080	Target Address	N.A.
I021/090	Figure of Merit	N.A.
I021/095	Velocity	N.A.
I021/110	Trajectory Intent	N.A.
I021/130	Position in WGS-84 co-ordinates	180/2 ^{23°}
I021/140	Geometric Altitude	6,25 ft
I021/145	Flight Level	1/4 FL
I021/146	Intermediate State Selected Altitude	25 ft
I021/148	Final State Selected Altitude	25 ft
I021/150	Air Speed	N.A.
I021/151	True Air Speed	N.A.
I021/152	Magnetic Heading	360/2 ^{16°}
I021/155	Barometric Vertical Rate	6,25 ft/min
I021/157	Geometric Vertical Rate	6,25 ft/min
I021/160	Ground Vector	N.A.
I021/165	Rate of Turn	1/4°/s
I021/170	Target Identification	N.A.
I021/200	Target Status	N.A.
I021/210	Link Technology Indicator	N.A.
I021/220	Met Report	N.A.
I021/230	Roll Angle	0,01 deg

Anhang B

Stabilitätsanalyse

B.1 CTD und MCTD

Werden Führungsgröße und Vorsteuerung nur zu diskreten Zeitpunkten zur Verfügung gestellt, muss eine Stabilitätsanalyse des digitalen Regelkreises nach dem Blockschaltbild in Abbildung B.1 durchgeführt werden.

Hierin ist die Führungsgröße die Position, an der sich das Target vor Δt_{soll} Sekunden, bzw. vor $\Delta t_{soll}/T$ Zeitschritten befunden hat. Dabei ist T die Zeitperiode, die zwischen dem Empfang von zwei Datenpunkten liegt. Bei einer ADS-B Übertragung der Daten beträgt der Wert 1s. Im CTD-Verfahren basiert die Vorsteuerung mit der Geschwindigkeit des Target ebenfalls auf dem Wert, der Δt_{soll} Sekunden in der Vergangenheit liegt. Im MCTD-Verfahren ist dieser Wert um einen Zeitschritt versetzt, um der stromabwärts gerichteten Fortpflanzung höherer Geschwindigkeiten bei Verzögerung des Target entgegenzuwirken (s. Blockschaltbild in Abb. B.2). Für die Stabilität ist die Vorsteuerung jedoch nicht von Bedeutung, weshalb eine Stabilitätsanalyse des CTD-Verfahrens auch für das MCTD-Verfahren gültig ist.

Die Ausgangsgrößen Geschwindigkeit und zurückgelegte Strecke werden nach der Abtastung dem nachfolgenden Trailing Aircraft zur Verfügung gestellt.

Die Regeldifferenz wird mittels eines PD-Reglers ausgeglichen. Ein I-Anteil im Regler (R) ist nicht erforderlich, da die Strecke durch Integration der resultierenden Geschwindigkeit bereits einen I-Anteil besitzt.

Die übrige Regelstrecke S_V beinhaltet das Luftfahrzeug mit Geschwindigkeitsregelung, welche nach Linearisierung als PT2 Strecke und Proportionalregler R_V abgebildet wird (s. Abb. B.3).

Die Übertragungsfunktion G_{PT1_V} (Gl. B.6) ergibt sich aus

$$\Psi = \dot{V} + \frac{\rho}{2m} S(c_{w0} + kc_a^2) V^2 - \frac{F}{m} = 0 \quad (\text{B.1})$$

mit

$$c_a = \frac{2mg}{\rho S V^2} \quad (\text{B.2})$$

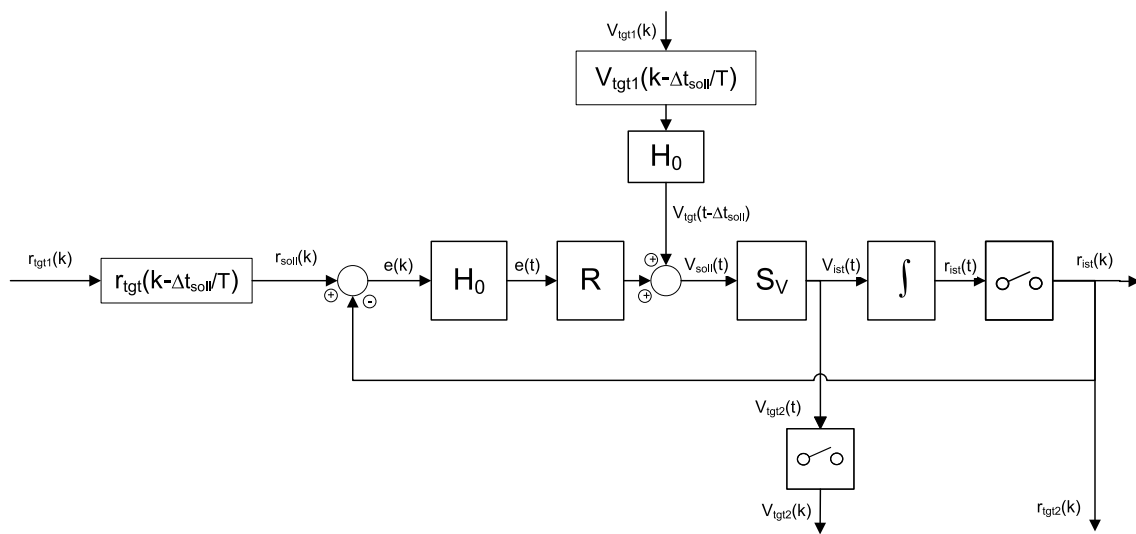


Abbildung B.1: Blockschaltbild des CTD-Regelkreises

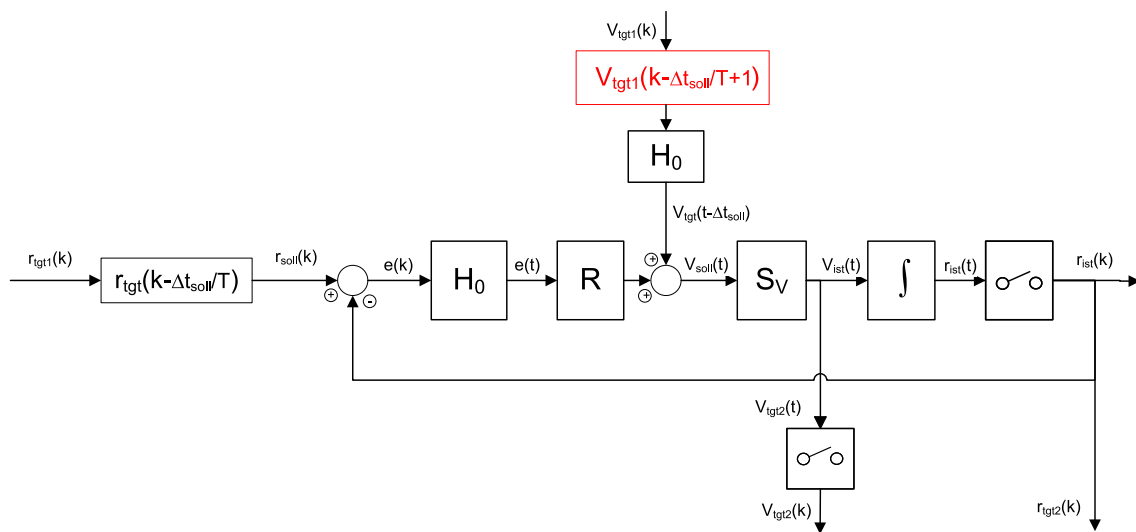
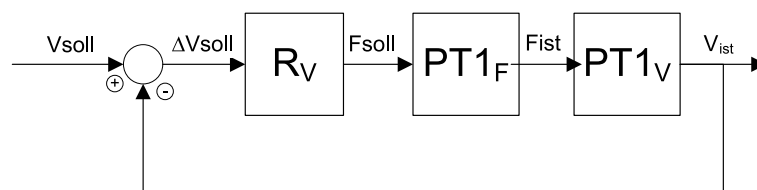


Abbildung B.2: Blockschaltbild des MCTD-Regelkreises

Abbildung B.3: Strecke S_V

Die Linearisierung um den Arbeitspunkt

$$\frac{\delta \Psi}{\delta \dot{V}}|_{AP} \Delta \dot{V} + \frac{\delta \Psi}{\delta V}|_{AP} \Delta V + \frac{\delta \Psi}{\delta F}|_{AP} \Delta F = 0 \quad (\text{B.3})$$

mit $\Delta \dot{V} = \dot{V} - \dot{V}_0 = \dot{V}$, $\Delta V = V - V_0$ und $\Delta F = F - F_0$ ergibt

$$\Delta \dot{V} + \left[\frac{\rho S c_{w0}}{m} V_0 + \frac{4km g^2}{\rho S} \frac{1}{V_0^3} \right] \Delta V = \frac{1}{m} \Delta F \quad (\text{B.4})$$

Damit wird

$$G_{PT1V}(s) = \frac{\frac{1}{m}}{\left(s + \left[\frac{\rho S c_{w0}}{m} V_0 + \frac{4km g^2}{\rho S} \frac{1}{V_0^3} \right] \right)} \quad (\text{B.5})$$

oder

$$G_{PT1V}(s) = \frac{K_V}{(T_V s + 1)} \quad (\text{B.6})$$

mit

$$K_V = \frac{1}{m \left[\frac{\rho S c_{w0}}{m} V_0 + \frac{4km g^2}{\rho S} \frac{1}{V_0^3} \right]} \quad (\text{B.7})$$

und

$$T_V = \frac{1}{\left[\frac{\rho S c_{w0}}{m} V_0 + \frac{4km g^2}{\rho S} \frac{1}{V_0^3} \right]} \quad (\text{B.8})$$

Mit exemplarischen Werten des Airbus A340

Masse: $m = 210\text{t}$

Flügelfläche: $S = 360\text{qm}$

Faktor des Auftriebswiderstandsbeiwertes: $k = 0,031$

Widerstandsbeiwert bei Nullauftrieb: $c_{w0} = 0,028$

am Arbeitspunkt $V_0 = 130\text{m/s}$ ergibt sich als Übertragungsfunktion

$$G_{PT1V}(s) = \frac{1}{210000(s + 0,0082)} \quad (\text{B.9})$$

Die verbleibende Übertragungsfunktion $G(R_V PT1_F)$ wurde zu

$$G_{R_V PT1_F}(s) = \frac{6000}{s + 0,3} \quad (\text{B.10})$$

bestimmt.

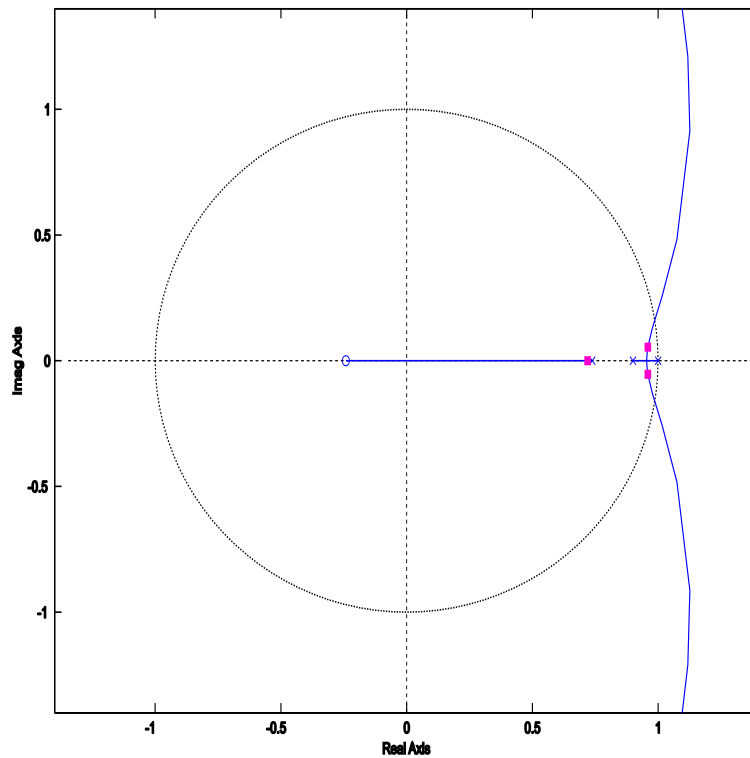


Abbildung B.4: Wurzelortskurve des diskreten CTD-Regelkreises mit reinem Proportionalregler, rot markierte Pole für $K_P = 0,05$

Eine im Laplace-Bereich vorliegende Übertragungsfunktion kann zur Diskretisierung mittels folgender Operation in den \mathcal{Z} -Bereich übertragen werden

$$G_0(z) = \frac{z-1}{z} \cdot \mathcal{Z} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \quad (\text{B.11})$$

wobei ein Halteglied 0ter Ordnung berücksichtigt ist.

Somit wird

$$G_0(z) = \frac{z-1}{z} \cdot \mathcal{Z} \left\{ G_R \cdot \frac{G_{RVPT1F} G_{PT1V}}{1 + G_{RVPT1F} G_{PT1V}} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s} \right\} \quad (\text{B.12})$$

Weitere Behandlung mittels Partialbruchzerlegung, Transformation und nach Schließen des Regelkreises gestaltet sich jedoch unhandlich, weswegen die Matlab Funktionen zur Berechnung der Wurzelortskurven im \mathcal{Z} -Bereich herangezogen wurden.

Der diskrete Regelkreis ist stabil, wenn alle Pole innerhalb des Einheitskreises liegen.

Bei reiner Gestaltung von R als Proportionalregler, also $G(R) = K_P$, ergeben sich die Pollagen des geschlossenen diskreten Regelkreises mit einer Abtastfrequenz von 1Hz wie in Abbildung B.4 dargestellt.

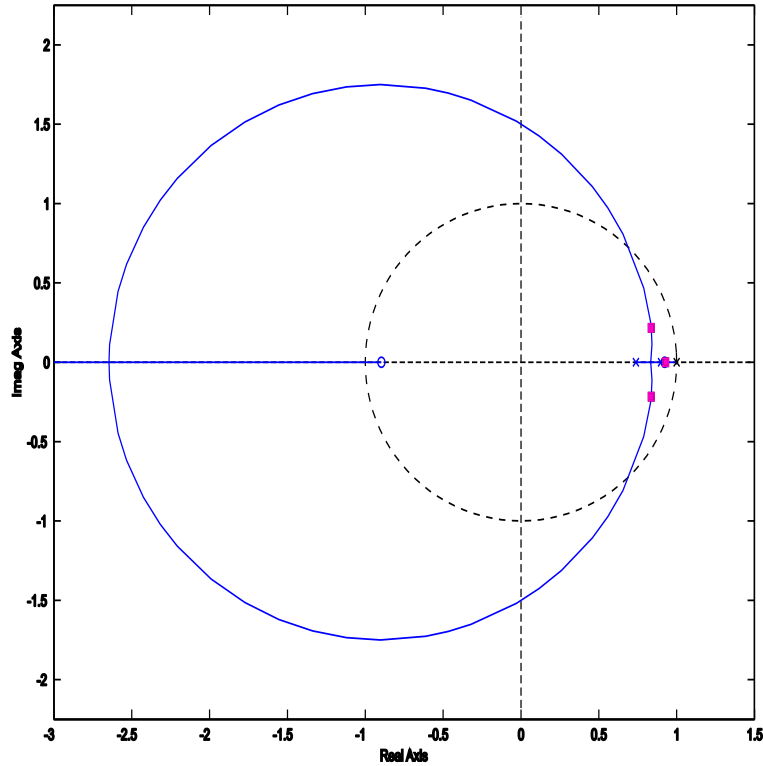


Abbildung B.5: Wurzelortskurve des diskreten CTD-Regelkreises mit zusätzlicher Nullstelle des PD-Reglers, rot markierte Pole für $K_D = 2,8$ und $K_P = 0,22$

Die Verstärkung an der Stabilitätsgrenze betrüge $K_P = 0,37$ und der Regelkreis wäre sehr langsam.

Setzt man dagegen den beabsichtigten PD-Regler ein mit

$$G_R(s) = K_D \left(s + \frac{K_P}{K_D} \right) \quad (\text{B.13})$$

ist der offene Regelkreis

$$G_0(s) = K_D \left(s + \frac{K_P}{K_D} \right) \cdot \frac{G_{RVPT1F} G_{PT1V}}{1 + G_{RVPT1F} G_{PT1V}} \cdot \frac{1}{s} \quad (\text{B.14})$$

und wegen

$$G(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} \quad (\text{B.15})$$

entspricht K_D der Kreisverstärkung.

Mit einer Nullstelle bei $\frac{K_P}{K_D} = -0,08$ ergibt sich die Wurzelortskurve wie in Abbildungen B.5 und B.6 dargestellt.

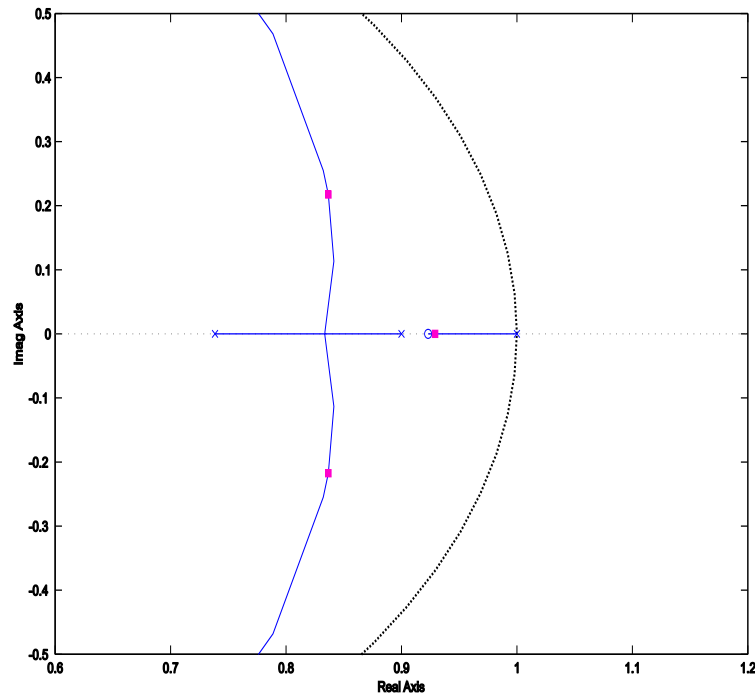


Abbildung B.6: Wurzelortskurve des diskreten CTD-Regelkreises mit zusätzlicher Nullstelle des PD-Reglers, Ausschnitt

Eine optimale Sprungantwort mit leichtem Überspringen (s. Abb. B.7) erhält man bei einer Kreisverstärkung von $K_D = 2,8$ bzw. $K_P = 0,22$. Die Pole des geschlossenen Regelkreises liegen hier bei $z = 0,92$ und dem komplexen Polpaar $z = 0,83 \pm 0,22i$ (rote Markierungen in Abb. B.5). Die Stabilitätsgrenze liegt bei einer Kreisverstärkung von $K_D = 24,3$ bzw. $K_P = 1,94$.

Beim CTD wandert der Einleitungspunkt einer Geschwindigkeitsrücknahme des Target mit jedem LFZ der Kette stromabwärts. Bei gleichem Verzögerungsverhalten der LFZ führt das zu einer notwendigen zeitweisen Korrektur der Geschwindigkeit des Trailing unter die Geschwindigkeit des Target. Wird die Begrenzung erreicht, ist der innere Geschwindigkeitsregelkreis als offen zu betrachten. Der gesamte geschlossene Regelkreis ist für die gewählten Werte von K_P und K_D ebenfalls stabil. Die Pole liegen dann bei $z = 0,878$ und $z = 0,874 \pm 0,17i$.

Sind die Berechnung von Führungsgröße und Vorsteuerung kontinuierlich, was umgesetzt werden kann, da die Werte auf bereits in der Vergangenheit akquirierten Daten basieren, ist der gesamte Regelkreis kontinuierlich. Stabilität liegt im kontinuierlichen Regelkreis dann vor, wenn sich alle Pole in der linken Halbebene befinden.

Die Stabilitätsgrenze bei einem Regelkreis mit reinem Proportionalregler liegt bei $K_P = 0,45$. Die zugehörige Wurzelortskurve zeigt Abbildung B.8.

Bei Verwendung eines PD-Reglers ist die Stabilität des kontinuierliche Regelkreises unabhängig von der Verstärkung. Die Wurzelortskurve sowie die zugehörige Sprungantwort für den kontinuierlichen Regelkreis bei mit einer Nullstelle bei $s = -0,1$ und $K_P = 0,28$, $K_D = 2,8$ zeigen Abbildungen B.9 und B.10.

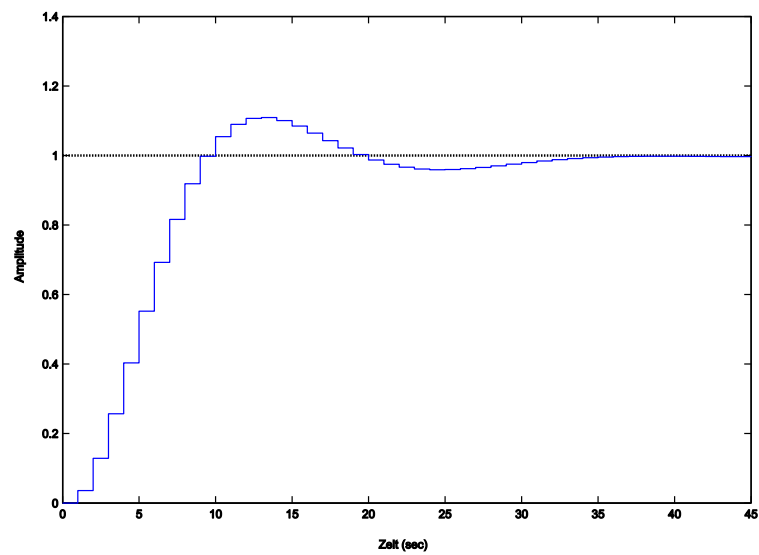


Abbildung B.7: Sprungantwort des diskreten CTD-Regelkreises mit PD-Regler für $K_P = 0,22$

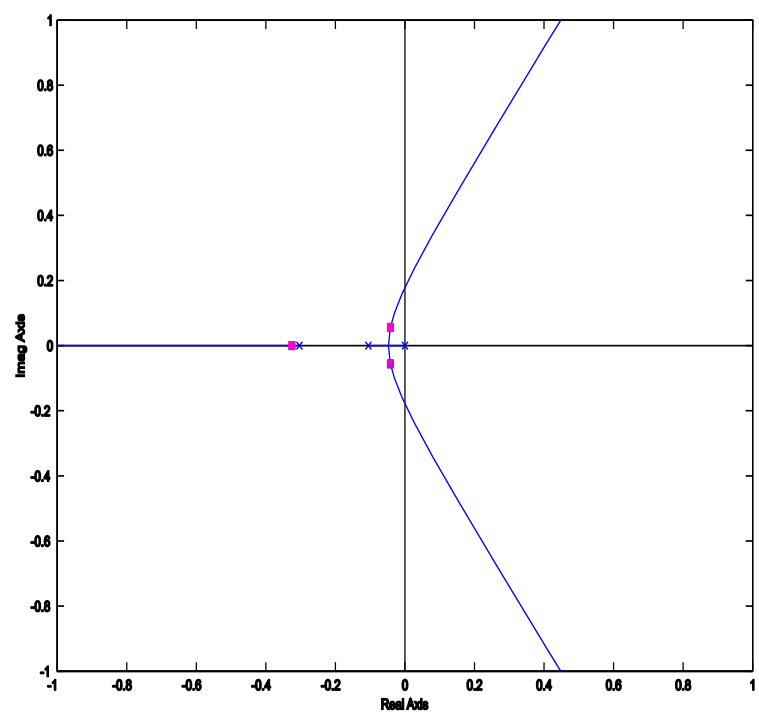


Abbildung B.8: Wurzelortskurve des kontinuierlichen CTD-Regelkreises reinem Proportionalregler, rot markierte Pole für $K_P = 0,05$

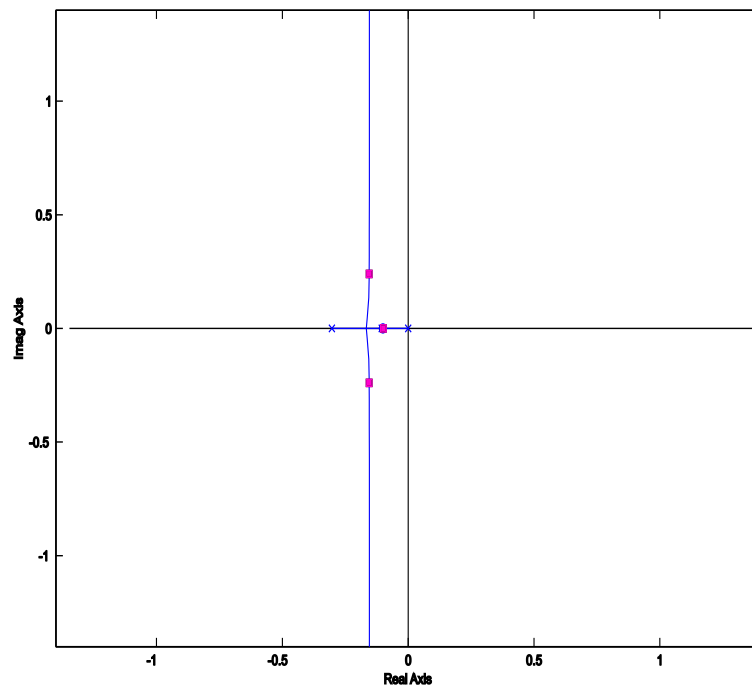


Abbildung B.9: Wurzelortskurve des kontinuierlichen CTD-Regelkreises mit PD-Regler, rot markierte Pole für $K_P = 0,22$ und $K_D = 2,8$

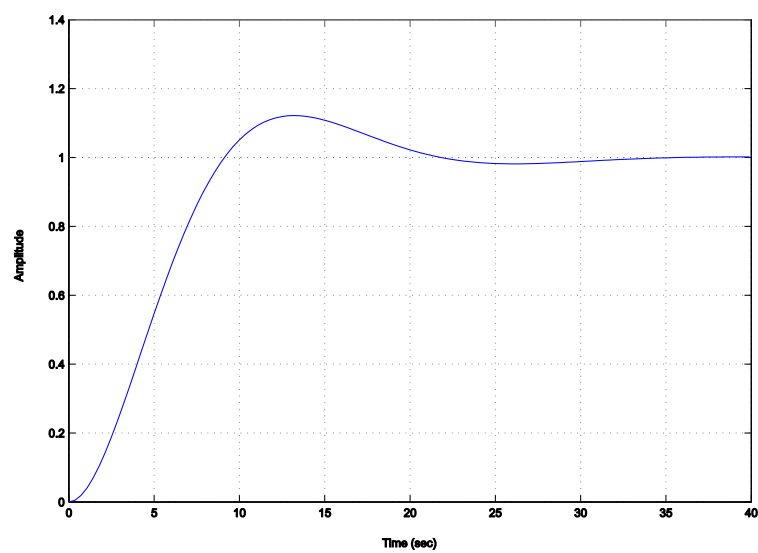


Abbildung B.10: Sprungantwort des kontinuierlichen CTD-Regelkreises mit PD-Regler für $K_P = 0,22$ und $K_D = 2,8$

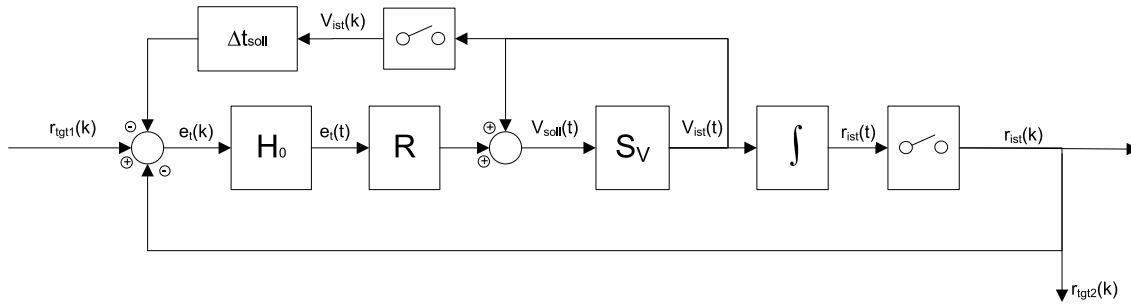


Abbildung B.11: Blockschaltbild des CTP-Regelkreises

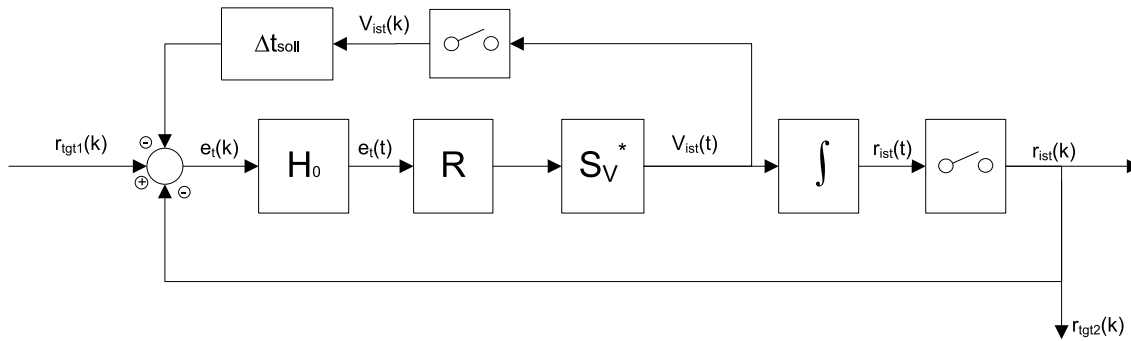


Abbildung B.12: Aufhebung der Vorsteuerung durch Öffnung des PT2-Regelkreises

B.2 CTP

Im Gegensatz zum CTD-Verfahren muss die Regelung im CTP-Verfahren nur im Diskreten betrachtet werden, da die zurückgelegte Strecke aus den aktuell empfangenen ADS-B Informationen entnommen wird und keine Vergangenheitsdaten benutzt werden.

Abbildung B.11 zeigt das Blockschaltbild des Regelkreismodells im CTP-Verfahren. Für die Berechnung der Regelabweichung wird gemäß Gleichung 4.8 neben der Rückführung der zurückgelegten Strecke des Trailing Aircraft auch dessen Geschwindigkeit benötigt.

Zur Bildung der kommandierten Geschwindigkeit nach Gleichung 4.6 wird die Geschwindigkeit des Trailing zur Vorsteuerung genutzt. Damit wird das PT2 Element aus Abbildung B.3 zur offenen Strecke S_V^* (s. Abb. B.12). Das Blockschaltbild ändert sich wie in Abbildung B.14 dargestellt. Fasst man die Rückführung der Regelgröße mit der Rückführung der Geschwindigkeit zusammen, ergibt sich eine Rückführung mit der Übertragungsfunktion

$$S_R(s) = (1 + \Delta t_{soll} s) \quad (\text{B.16})$$

die dem Messglied entspricht.

Abbildung B.13: PT2 Streckenelement S_V^*

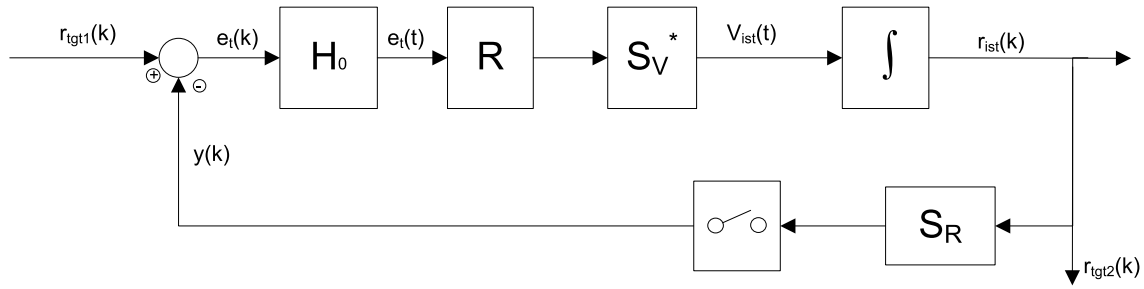


Abbildung B.14: Aufhebung der Vorsteuerung durch Öffnung des PT2-Regelkreises

Der offene Regelkreis ist

$$G_0(s) = K_D \left(s + \frac{K_P}{K_D} \right) \cdot G_{R_V PT1_F} G_{PT1_V} \cdot \frac{1}{s} \quad (\text{B.17})$$

Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises im \mathcal{Z} -Bereich lautet

$$G(z) = \frac{G_0(z)}{1 + G_0(z) \cdot S_R(z)} \quad (\text{B.18})$$

wobei im charakteristischen Polynom die Übertragungsfunktion der Rückführung berücksichtigt werden muss.

Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises im Laplace-Bereich wurde mittels Matlab in den \mathcal{Z} -Bereich transformiert. Eine direkte Verwendung der Wurzelortskurvenfunktion von Matlab ist aufgrund der Rückführung nicht möglich. Abbildungen B.15 bis B.18 zeigen die Pollagen des geschlossenen Regelkreises für verschiedene Nullstellenlagen $-\frac{K_P}{K_D}$ und Werte von K_D von jeweils 0,01, 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 10 und 100.

Der geschlossene Regelkreis ist für alle Werte stabil.

Auch im CTP-Verfahren besitzt die Strecke einen I-Anteil, weswegen ein PD-Regler ausreichend ist. Für K_P und K_D wurden die gleichen Werte gewählt, die auch beim CTD-Regler eingesetzt wurden. Die zugehörige Sprungantwort zeigt Abbildung B.19.

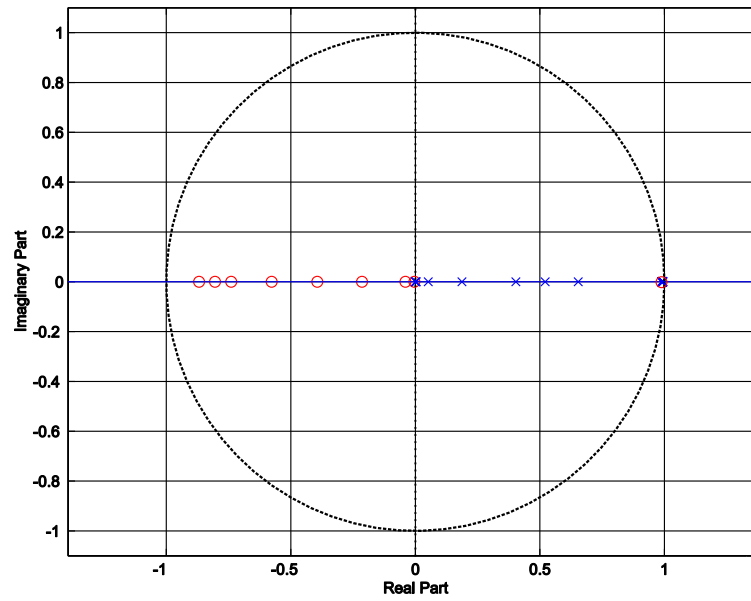


Abbildung B.15: Pol/Nullstellendiagramm des geschlossenen CTP-Regelkreises für $\frac{K_P}{K_D} = 0,01$

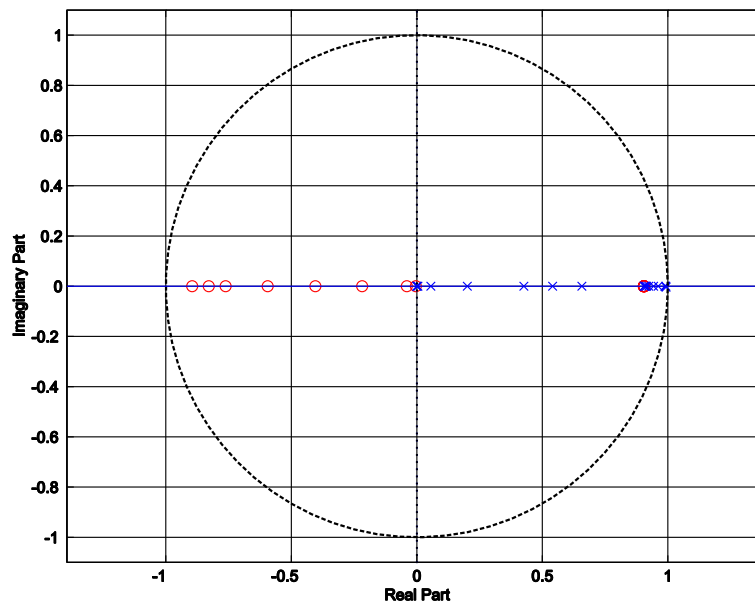


Abbildung B.16: Pol/Nullstellendiagramm des geschlossenen CTP-Regelkreises für $\frac{K_P}{K_D} = 0,1$

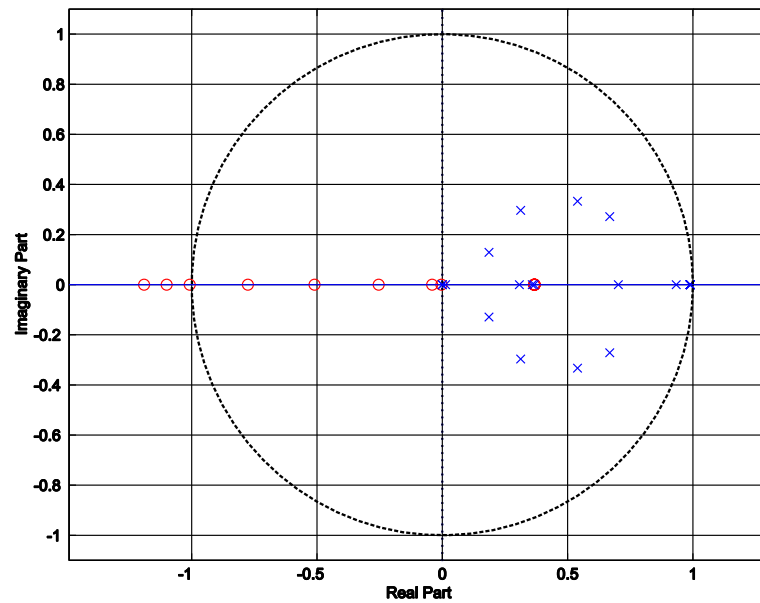


Abbildung B.17: Pol/Nullstellendiagramm des geschlossenen CTP-Regelkreises für $\frac{K_P}{K_D} = 1$

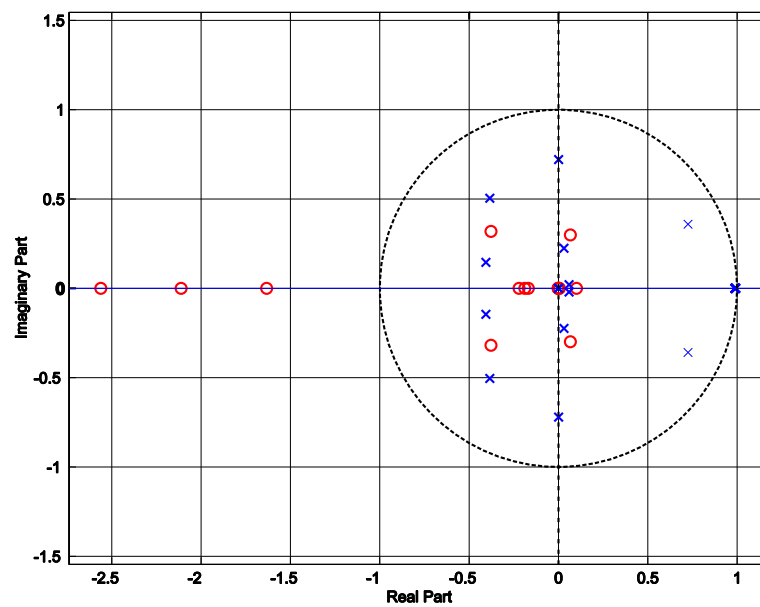


Abbildung B.18: Pol/Nullstellendiagramm des geschlossenen CTP-Regelkreises für $\frac{K_P}{K_D} = 10$

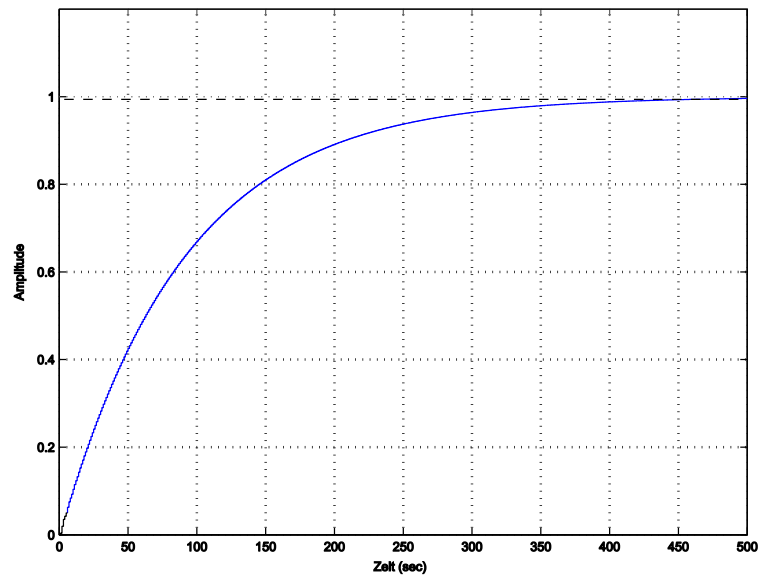


Abbildung B.19: Sprungantwort des geschlossenen CTP-Regelkreises für $K_P = 0,28$ und $K_D = 2,8$

Anhang C

Δv_{cmd} im PP Verfahren

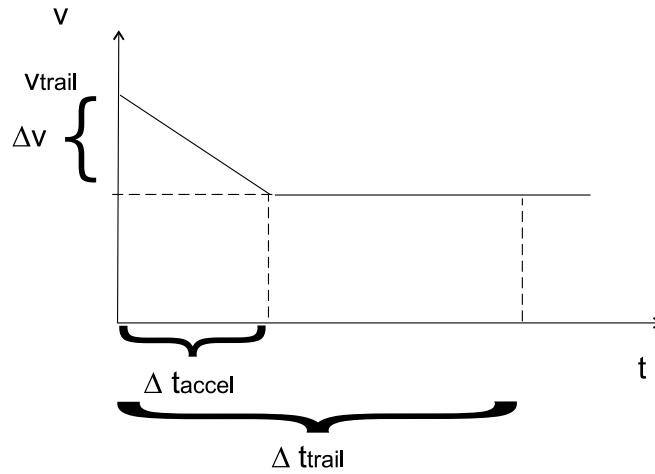


Abbildung C.1: Zurückgelegte Strecke des Trailing

Gesucht wird die zu kommandierende Geschwindigkeitsänderung des Trailing in Abhängigkeit der erforderlichen Ankunftszeit am Mergepunkt.

Die Vorgabe der Zeitspanne ergibt sich aus der Flugdauer des Targets bis zum Fix und dem zeitlichen Sollabstand.

$$\Delta t_{trail} = t_{tgt} + \Delta t_{soll} = \frac{d_{tgt}}{v_{tgt}} + \Delta t_{soll} \quad (C.1)$$

Die zurückgelegte Strecke des Trailing bei Annahme konstanter Beschleunigung ist

$$d_{trail} = (v_{trail} - \Delta v) \cdot \Delta t_{trail} + \frac{\Delta v \cdot t_{accel}}{2} \quad (C.2)$$

und

$$t_{accel} = \frac{\Delta v}{a_{trail}} \quad (C.3)$$

mit a_{trail} als der Beschleunigung des Trailing. Das heißt

$$d_{trail} = v_{trail} \cdot \Delta t_{trail} - \Delta v \cdot \Delta t_{trail} + \frac{\Delta v^2}{2a_{trail}} \quad (C.4)$$

oder

$$0 = \Delta v^2 - \Delta v \cdot 2a_{trail} \cdot \Delta t_{trail} + 2a_{trail}(v_{trail} \cdot \Delta t_{trail} - d_{trail}) \quad (C.5)$$

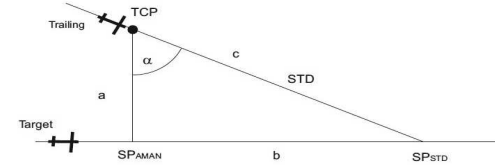
Damit ist

$$\Delta v = a_{trail} \cdot \Delta t_{trail} + \sqrt{a_{trail}^2 \cdot \Delta t_{trail}^2 - 2a_{trail}(v_{trail} \cdot \Delta t_{trail} - d_{trail})} \quad (C.6)$$

Anhang D

Ableitung der Randbedingungen für das Merging mit Trackfächer

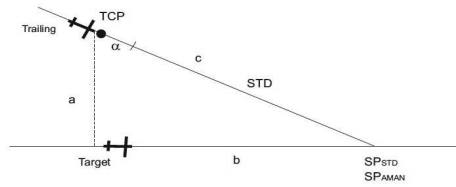
$\alpha =$	53,1 deg	Referenzgeschwindigkeit:	265 kts
$a =$	15 nmi	STD =	Standardtrajektorie
$b =$	25 nmi		
$c =$	20 nmi		



Sollabstand [s]	Geschwindigkeit des Target [kts]	Geschwindigkeit des Trailing [kts]	Verspätung des Target [s]	Verspätung des Trailing [s]	Entfernung des Trailing zum Schnittpunkt entlang STD [s]	Entfernung des Target zum Schnittpunkt mit STD wenn Trailing am TCP [s]	Entfernung des Target zum Schnittpunkt mit STD wenn Trailing am TCP [nmi]	Vom Trailing detektierte Entfernung zum Target [s]	Vom Trailing detektierte Fehler [s]	Entfernung des Target zum neuen Schnittpunkt [nmi]	Entfernung des Target zum neuen Schnittpunkt [s]	Entfernung des Trailing zum neuen Schnittpunkt [s]	Entfernung des Trailing zum Schnittpunkt auf STD entlang vom AMAN geplanter Trajektorie [s]	Winkel- abweichung des Trailing [deg]	Vom Trailing detektierte Entfernung zum Target [s]	Erforderliche Geschwindigkeit bei maximalem Track [kts]
90	265	265	0	0	340	385	28,4	-46	-136	8,4	114	204	475	0,0	90	265,0
90	270	260	-20	0	346	358	26,9	-12	-102	9,0	120	210	475	8,0	90,0	
90	260	270	-20	0	333	373	26,9	-40	-130	8,0	110	200	475	4,0	90,0	
90	270	260	20	0	346	398	29,9	-52	-142	9,9	132	208	475	0,0	76,0	243,6
90	260	270	20	0	333	413	29,8	-80	-170	9,8	136	200	475	0,0	64,0	239,0
90	270	260	-10	0	346	368	27,6	-22	-112	8,9	118	208	475	4,8	90,0	
90	260	270	-10	0	333	383	27,7	-50	-140	7,9	110	200	475	1,1	90,1	
90	270	260	10	0	346	388	29,1	-42	-132	9,1	122	208	475	0,0	86,0	255,1
90	260	270	10	0	333	403	29,1	-70	-160	9,1	126	200	475	0,0	74,0	250,0
90	270	260	-5	0	346	373	28,0	-27	-117	8,8	118	208	475	3,2	90,2	
90	260	270	-5	0	333	388	28,0	-55	-145	8,0	111	200	475	0,0	89,0	268,7
90	270	260	5	0	346	383	28,8	-37	-127	8,8	117	208	475	0,2	90,3	
90	260	270	5	0	333	398	28,7	-65	-155	8,7	121	200	475	0,0	79,0	256,0
180	265	265	0	0	340	295	21,75	44	-136	1,8	23,77	203,77	475	0,0	180,0	
180	270	260	-20	0	346	270	20,3	76	-104	2,2	29,31	209,44	475	7,4	180,1	
180	260	270	-20	0	333	281	20,3	52	-128	1,5	20,58	200,62	475	4,5	180,0	
180	270	260	20	0	346	310	23,3	36	-144	3,3	43,33	207,69	475	0,0	164,4	241,8
180	260	270	20	0	333	321	23,2	12	-168	3,2	44,23	200,00	475	0,0	155,8	240,8
180	270	260	-10	0	346	280	21,0	66	-114	2,1	28,37	208,28	475	4,3	179,9	
180	260	270	-10	0	333	291	21,0	42	-138	1,4	20,03	200,08	475	1,6	180,0	
180	270	260	10	0	346	300	22,5	46	-134	2,5	33,33	207,69	475	0,0	174,4	253,1
180	260	270	10	0	333	311	22,5	22	-158	2,5	34,23	200,00	475	0,0	165,8	252,1
180	270	260	-5	0	346	285	21,4	61	-119	2,1	27,77	207,92	475	2,7	180,2	
180	260	270	-5	0	333	296	21,4	37	-143	1,4	19,96	200,00	475	0,2	180,0	
180	270	260	5	0	346	295	22,1	51	-129	2,1	28,33	207,69	475	0,0	179,4	259,2
180	260	270	5	0	333	306	22,1	27	-153	2,1	29,23	200,00	475	0,0	170,8	258,1

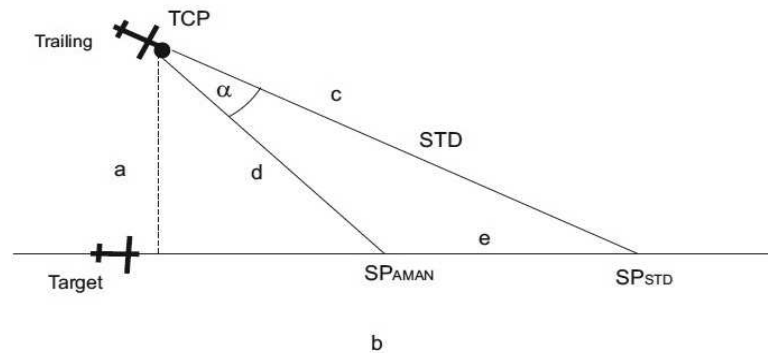
Abbildung D.1: Trackabweichungen und kommandierte Geschwindigkeiten im Szenario mit Targetübermittlung wenn AMAN Track maximal

$\alpha =$	53,1 deg	Referenzgeschwindigkeit:	265 kts
$a =$	15 nmi	STD=	Standardtrajektorie
$b =$	25 nmi		
$c =$	20 nmi		



Sollabstand [s]	Geschwindig- keit des Target [kts]	Geschwindig- keit des Trailing [kts]	Verspätung des Target [s]	Verspätung des Trailing [s]	Entfernung des Trailing zum Schnittpunkt entlang STD [s]	Entfernung des Target zum Schnittpunkt mit STD wenn Trailing am TCP [s]	Entfernung des Target zum Schnittpunkt mit STD wenn Trailing am TCP [nmi]	Vom Trailing detektierte Entfernung zum Target [s]	Vom Trailing detektierter Fehler [s]	Entfernung des Target zum neuen Schnittpunkt [nmi]	Entfernung des Target zum neuen Schnittpunkt [s]	Entfernung des Trailing zum neuen Schnittpunkt [s]	Entfernung des Trailing zum Schnittpunkt auf STD entlang vom AMAN geplanter Trajektorie [s]	Winkel- abweichung des Trailing [deg]	Vom Trailing detektierte Entfernung zum Target [s]	Erforderliche Geschwindigkeit bei maximalem Track [kts]
90	265	265	0	0	340	250	18,4	90	0	18,4	249	339	340	0,0	90	
90	270	260	-20	0	277	225	16,9	52	-38	16,9	225	346	340	0,0	121,2	286,0
90	260	270	-20	0	333	234	16,9	99	9	16,9	234	333	340	0,0	99,0	277,7
90	270	260	20	0	346	265	19,9	81	-9	16,5	220	310	340	5,1	89,9	
90	260	265	20	0	340	274	19,8	65	-25	13,3	184	274	340	11,2	89,9	
90	260	270	20	0	333	274	19,8	59	-31	12,3	170	260	340	13,4	90,0	
90	270	260	-10	0	346	235	17,6	111	21	17,6	235	346	340	0,0	111,2	277,2
90	260	270	-10	0	333	244	17,7	89	-1	17,3	240	330	340	0,4	89,9	
90	270	260	10	0	346	255	19,1	91	1	19,1	255	346	340	0,0	91,2	261,1
90	260	265	10	0	340	264	19,1	75	-15	14,8	205	295	340	6,8	90,1	
90	260	270	10	0	333	264	19,1	69	-21	13,6	188	278	340	9,1	90,0	
90	270	260	-5	0	346	240	18,0	106	16	18,0	240	346	340	0,0	106,2	273,0
90	260	270	-5	0	333	249	18,0	84	-6	16,2	224	314	340	2,6	90,0	
90	270	260	5	0	346	250	18,8	96	6	18,7	250	346	340	0,0	96,2	264,9
90	260	265	5	0	340	259	18,7	80	-10	15,8	218	308	340	4,5	90,1	
90	260	270	5	0	333	259	18,7	74	-16	14,3	198	288	340	7,0	90,1	
180	265	265	0	0	340	160	11,8	180	0	11,7	159	339	340	0,0	180	265,2
180	270	260	-20	0	277	137	10,3	140	-40	10,2	136	346	340	0,0	209,5	284,5
180	260	270	-20	0	267	143	10,3	124	-56	10,3	142	333	340	0,0	190,7	279,2
180	270	260	20	0	277	177	13,3	100	-80	9,4	125	305	340	6,0	179,9	
180	260	270	20	0	267	183	13,2	84	-96	6,0	83	263	340	12,6	179,9	
180	270	260	-10	0	277	147	11,0	130	-50	11,0	146	346	340	0,0	199,5	275,8
180	260	270	-10	0	267	153	11,0	114	-66	11,0	152	333	340	0,0	180,7	270,8
180	270	260	10	0	277	167	12,5	110	-70	12,3	164	344	340	0,2	179,9	
180	260	270	10	0	267	173	12,5	94	-86	7,3	101	281	340	8,4	180,1	
180	270	260	-5	0	277	152	11,4	125	-55	11,4	151	346	340	0,0	194,5	271,6
180	260	270	-5	0	267	158	11,4	109	-71	10,1	140	320	340	1,8	179,9	
180	270	260	5	0	277	162	12,1	115	-65	12,1	161	346	340	0,0	184,5	263,6
180	260	270	5	0	267	168	12,1	99	-81	8,1	113	293	340	6,2	180,0	

Abbildung D.2: Trackabweichungen und kommandierte Geschwindigkeiten im Szenario mit Targetübermittlung wenn AMAN Track und STD Track identisch



a=	15,0
b=	20,0
c=	25,0

Standardsollabstand:	90 s
	6,6 nmi
Referenzgeschwindigkeit:	265 kts
Maximaler Winkel:	53,1 deg
Maximaler zulässiger Winkel für Identifizierung d. Sollabstands:	20,0 deg

Entfernung des Target von SP_STD [nmi]	Entfernung des Trailing zum Schnittpunkt entlang STD [nmi]	d+e [nmi]	α [deg]	Vom Trailing detektierte Entfernung zum Target entlang STD [nmi]	Beabsichtigte Entfernung [nmi]	Abweichung zwischen detektierter und beabsichtigter Entfernung zum Target [nmi]
28,4	25,0	35,0	53,0	-3,4	6,6	-10,0
25,3	25,0	31,9	40,0	-0,3	6,6	-6,9
23,3	25,0	29,9	30,0	1,7	6,6	-4,9
21,5	25,0	28,1	20,0	3,5	6,6	-3,1

Abbildung D.3: Ermittlung des maximal möglichen Winkels im Fächer im Szenario ohne Targetübermittlung

Anhang E

BADA Daten für Simulation

Parameter	A319	A320	A321	A340	B737	B747
m	60	64	72	210	65	285
c_{w0}	0,028	0,024	0,0275	0,0185	0,024	0,0185
k	0,031	0,0375	0,0369	0,036	0,041	0,0513
S	122	122	122	361	124	511
T_{max}	115,4	110,4	124,6	297,7	120,7	550,1

- m = Referenzmasse in Tonnen
 c_{w0} = Widerstandsbeiwert bei Nullauftrieb
 k = Faktor des Auftriebswiderstandsbeiwertes
 S = Flügelfläche in Quadratmetern
 T_{max} = Maximaler Schub in Kilo-Newton

$$c_W = c_{w0} + k c_A^2$$

Tabelle E.1: Simulationsparameter verwendeter Lfz-Muster

Anhang F

Flussdiagramme für den Gesamtablauf des ASAS Verfahrens

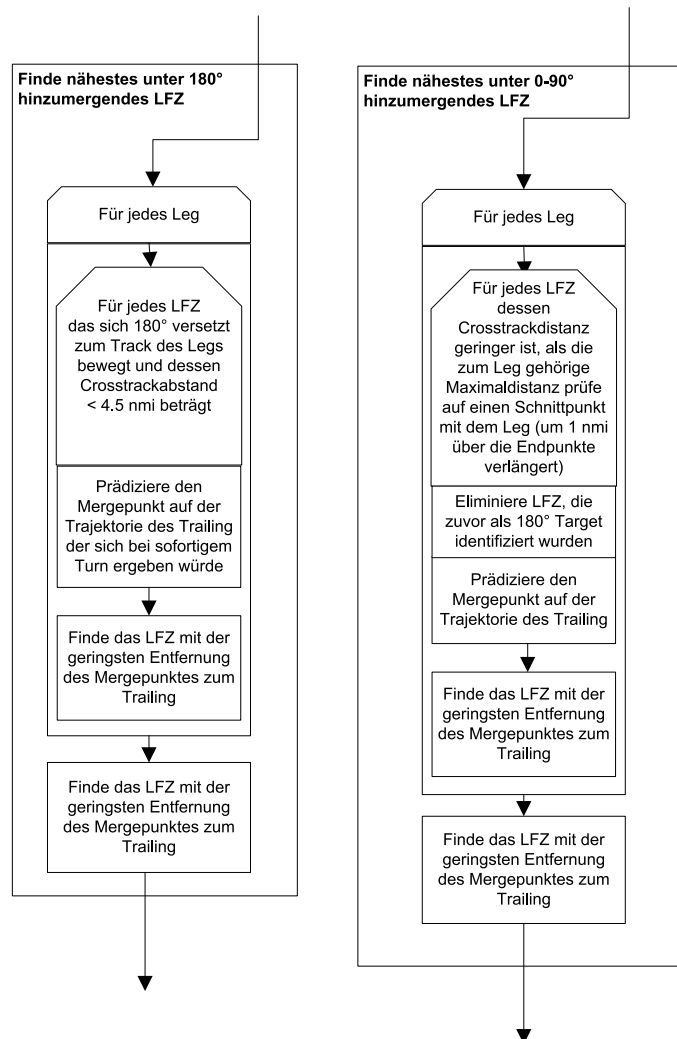


Abbildung F.1: Finden der nächsten Targets (Szenario 2)

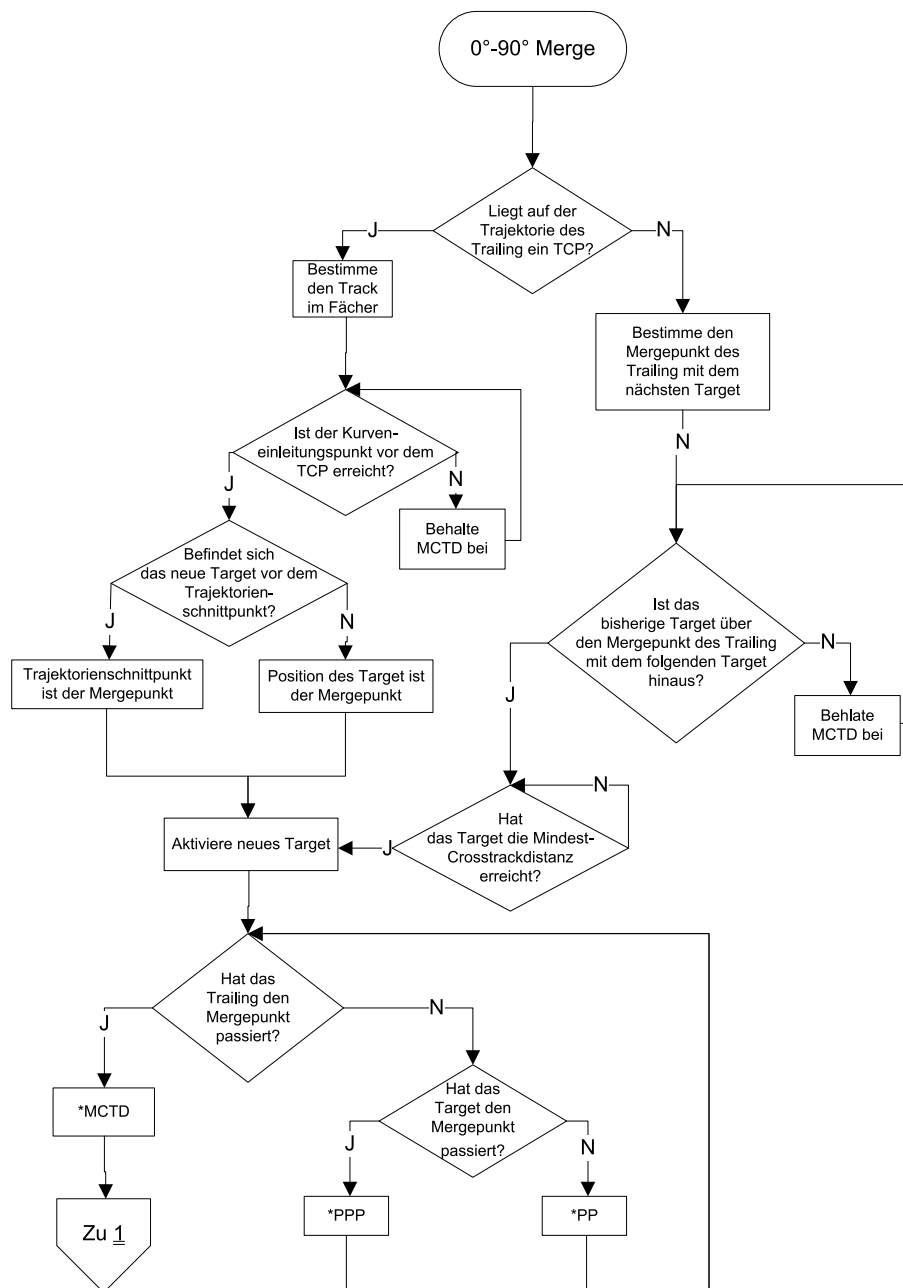


Abbildung F.2: 0° bis 90° Merge aus Sicht des Trailing

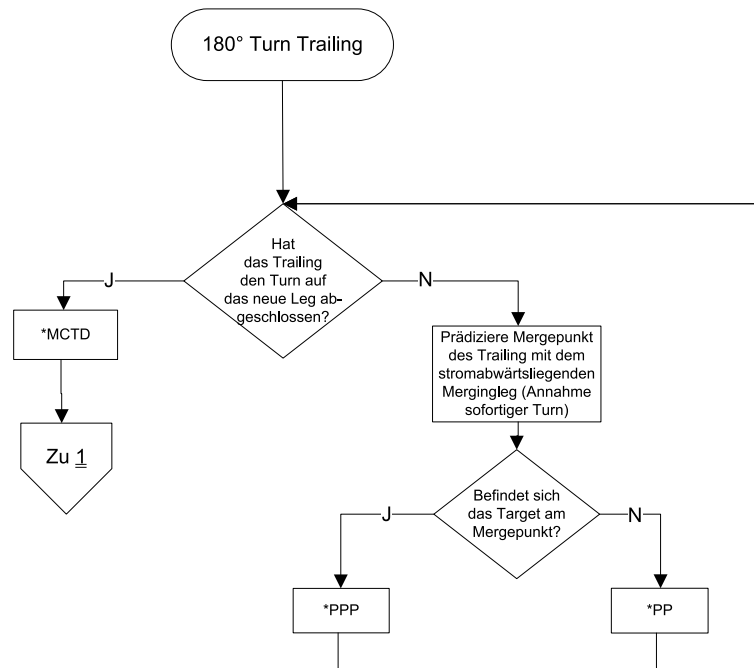


Abbildung F.3: 180° Merge mit Turn des Trailing

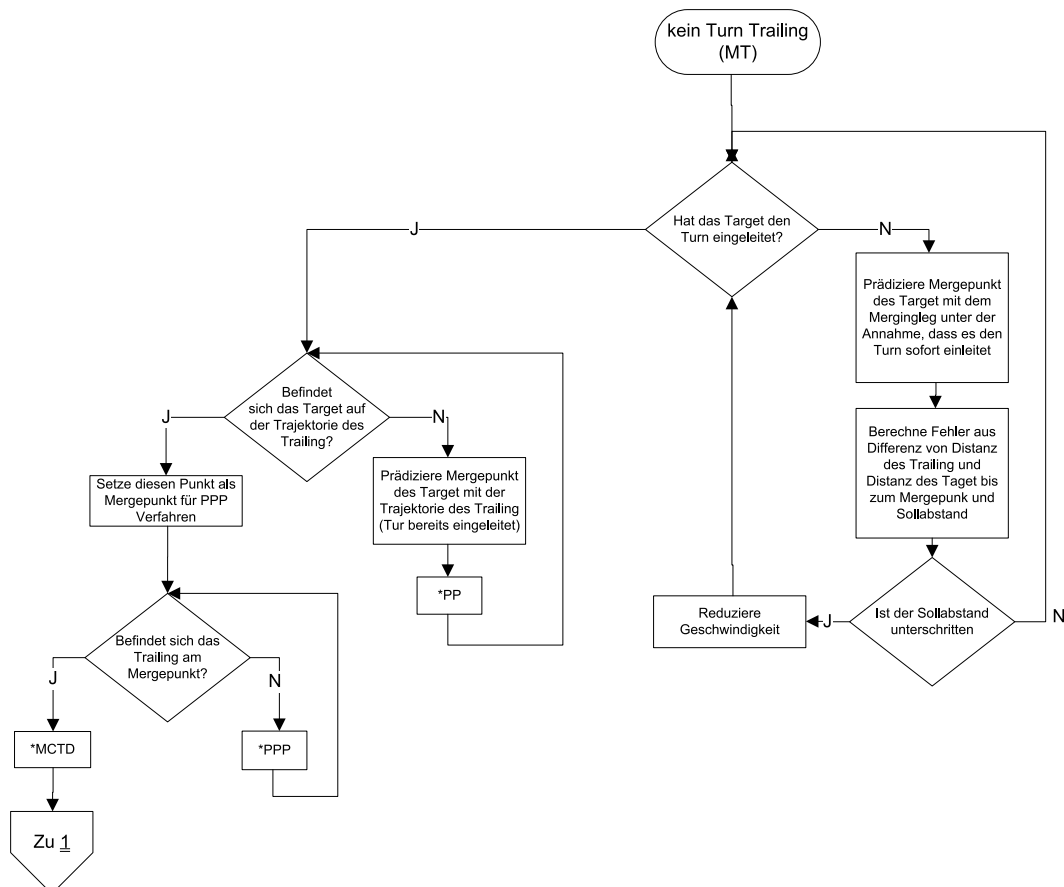


Abbildung F.4: 180° Merge mit Turn des Target bei übermittelten Targets

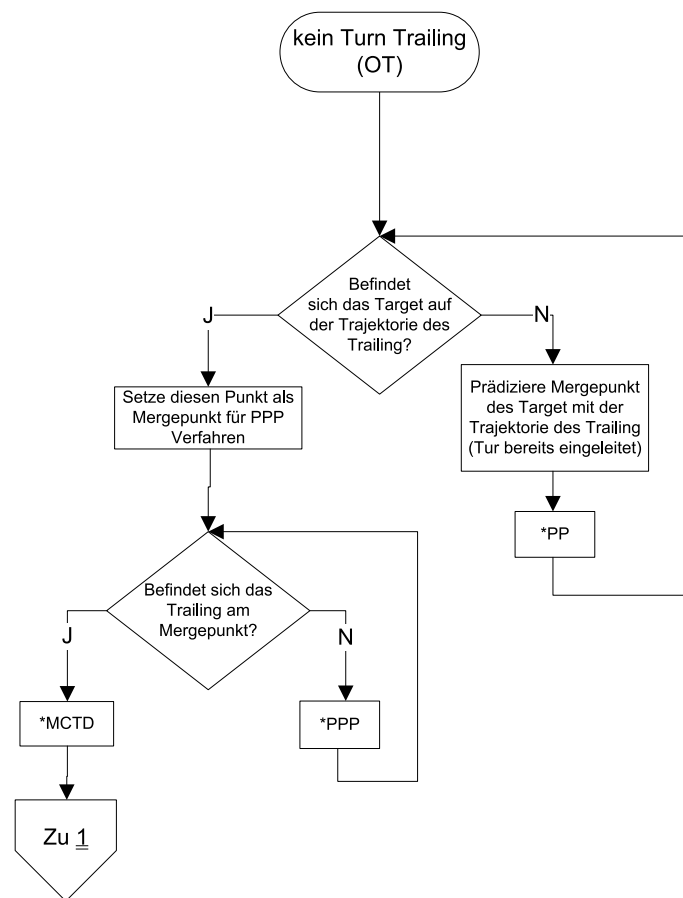


Abbildung F.5: 180° Merge mit Turn des Target bei nicht übermittelten Targets

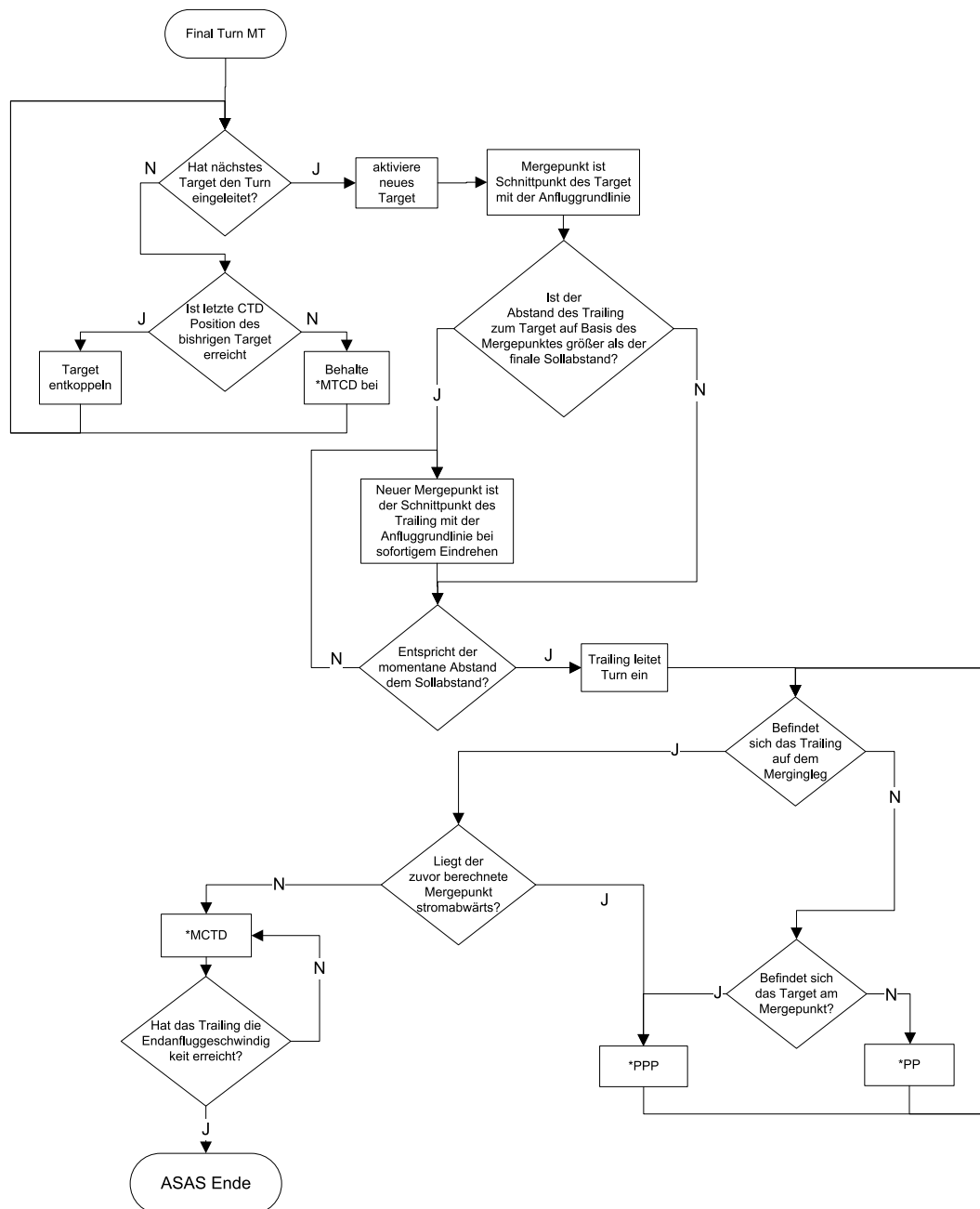


Abbildung F.6: Final Turn des Trailing bei übermittelten Targets

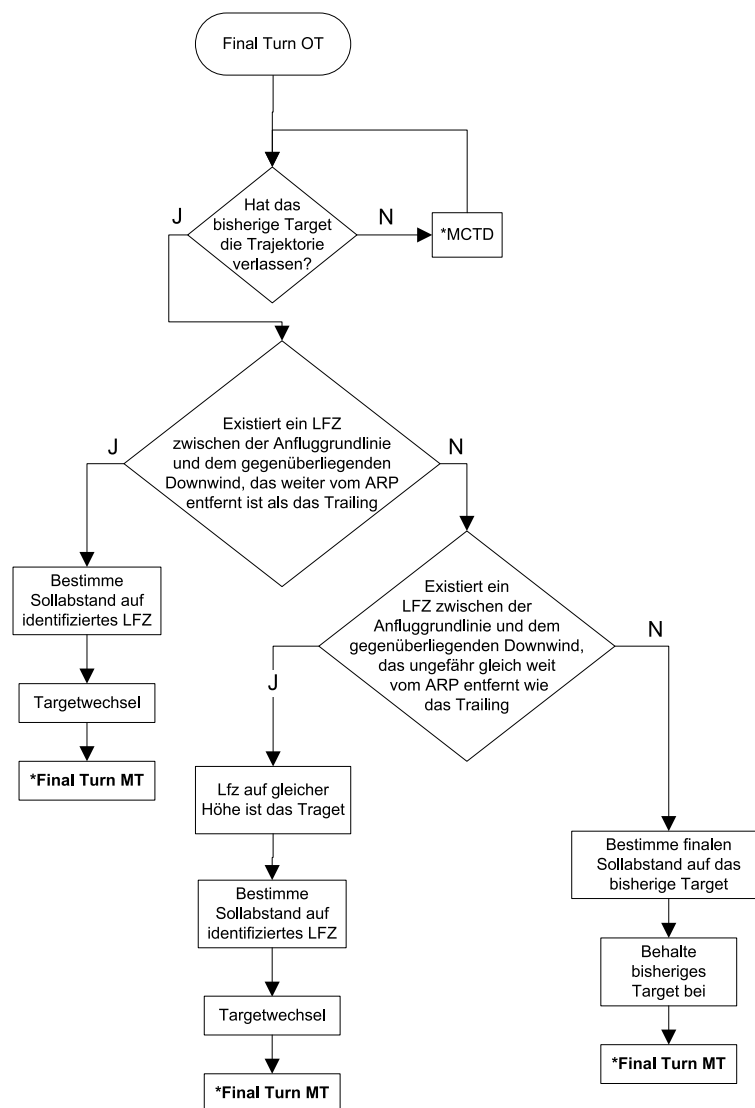


Abbildung F.7: Final Turn des Trailing bei nicht übermittelten Targets

Literaturverzeichnis

- [AC] AIRPORT-CDM. <http://www.euro-cdm.org/>.
- [BB04] B. BARMORE, T. ABBOTT, K. KRISHNAMURTHY: *Airborne-Managed Spacing in Multiple Arival Streams*. 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.
- [BB05] B. BARMORE, T. ABBOTT, W. CAPRON: *Evaluation of Airborne Precision Spacing in a Human-in-the-Loop Experiment*. AIAA 5th Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO); 26-28 Sep. 2005; Arlington, VA; United States, 2005.
- [Bro94] BROCKHAUS, R.: *Flugregelung*. Springer Verlag, 1994.
- [CAT05] EUROCONTROL FOR THE C-ATM CONSORTIUM: *C-ATM High Level Operational Concept*, 2005.
- [COS] COSPACE: *Towards the Use of Spacing Instructions*. http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/SSP_cospace_home.html.
- [DW86] D. WILLIAMS, D. WELLS: *Jet Transport Flight Operations Using Cockpit Display of traffic Information During Instrumental Meteorological Conditions, Simulation Evaluation*. NASA Techreport TP-2567, 1986.
- [EC00] EUROPEAN COMMISSION, FOURTH FRAMEWORK PROGRAMME: *Emerald - Emerging RTD activities of relevance to ATM concept definition*. Nummer 928284627X. Luxembourg : Office for Official Publ. of the Europ. Communities, 2000.
- [EH00] E. HOFFMAN, J. BELLMAN, S. GRANDPERRET K. ZEGHAL: *Traffic Analysis with FAST-TIME Simulations to Evaluate Delegation Potentialities od Sequencing Operations*. 19th Digital Avionics and Systems Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 2000.
- [EH02] E. HOFFMAN, D. IVANESCU, C. SHAW K. ZEGHAL: *Analysis of Spacing Guidance for Sequencing Aircraft on Merging Trajectories*. 21st Digital Avionics Systems Conference, Irvine, 2002.
- [EH03] E. HOFFMAN, D. IVANESCU, C. SHAW K. ZEGHAL: *Analysis of Constant Time Delay Airborne Spacing Between Aircraft of Mixed Types in Varying Wind Conditions*. 5th USA/Europe ATM R&D Seminar, Budapest, 2003.

- [EUR03] EUROCONTROL: *Air Traffic management Strategy for the Years 2000+ - Volumes I+II*, 2003.
- [EUR08] EUROCONTROL: *CASCADE Validation Report*, 2008.
- [EUR10a] EUROCONTROL: *E-OCVM, European Operational Concept Validation Methodology, Edition 3*, 2010.
- [EUR10b] EUROCONTROL: *User Manual for the Base of Aircraft Data*, 2010.
- [G2G07] THALES FOR THE GATE TO GATE CONSORTIUM: *Gate to Gate Final Report*, 2007.
- [GL05] G. LOHR, R. OSEGUERA-LOHR, T. ABBOTT W. CAPRON: *A Time-Based Airborne Inter-Arrival Spacing Tool: Flight Evaluation Results*. *Air Traffic Control Quarterly*, 13 No.2, 2005.
- [ICA02] ICAO: *Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems - Doc 9750 AN/963*, 2. Auflage, 2002.
- [ICA07] ICAO: *Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management - Doc. 4444 ATM/501*, 15 Auflage, 2007.
- [IG05] I. GRIMAUD, E. HOFFMAN, L. ROGNIN K. ZEGHAL: *Spacing Instructions in Approach: A stepwise design*. *Air Traffic Control Quarterly*, 13 No.2:127 ff., 2005.
- [JS83] J.A. SOERENSEN, T. GOKA: *Analysis of in-trail following dynamics of CDTI equipped aircraft queues*. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 6:pp. 162–169, 1983.
- [KK05] K. KRISHNAMURTHY, B. BARMORE, F. BUSSINK: *Airborne Precision Spacing In Merging Terminal Arrival Routes: A Fast-Time Simulation Study*. 6th ATM Seminar, Baltimore MD, USA, 2005.
- [LC90] L. CREDEUR, J. HOUCK, W. CAPRON G. LOHR: *Delivery Performance of Conventional Aircraft by Terminal Area, Time Based Air Traffic Control. A Real Time Simulation Evaluation*. NASA Techreport TP-2978, 1990.
- [MAA03a] NLR FOR THE MA-AFAS CONSORTIUM: *The More Autonomous Aircraft in the Future Air Traffic Management System - Results of Pilot-in-the-Loop Simulator Trials for ASAS Spacing*, 2003.
- [MAA03b] QUINETIC FOR THE MA-AFAS CONSORTIUM: *The More Autonomous Aircraft in the Future Air Traffic Management System - Flight Test Validation Report*, 2003.
- [PHA] PHARE: *Programme for Harmonised ATM Research in EUROCONTROL*. http://www.eurocontrol.int/phare/public/subsite_homepage/homepage.html.

- [POA01] FAA/EUROCONTROL: *Principles of Operations for the Use of ASAS*, 2001.
- [ROL02] R. OSEGUERA-LOHR, G. LOHR, T. ABBOTT T. EISCHEID: *Evaluation of Operational Procedures for Using a Time-Based Airborne Inter-Arrival Spacing Tool*. AIAA Aircraft Technology, Integration and Operations Technical, 2002.
- [SES05] SESAR CONSORTIUM FOR THE SESAR DEFINITION PHASE: *SESAR Master Plan - D5, Eurocontrol*, 2005.
- [SES07] SESAR CONSORTIUM FOR THE SESAR DEFINITION PHASE: *The ATM Target Concept - D3, Eurocontrol*, 2007.
- [SRI] SRIA: *Strategic Research and Innovation Agenda*. <http://www.acare4europe.org/sria>.
- [TC01] T. CAETANO, E. HOFFMAN, K. ZEGHAL: *Delegation of Sequencing Operations to the Flight Crew: First Quantitative Results*. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2001.
- [TC05] T. CALLANTINE, P. LEE, J. MERCER T. PREVOT: *Air and Ground Simulation Of Terminal-Area FMS Arrivals with Airborne Spacing and Merging*. 6th ATM Seminar, Baltimore, MD, USA, 2005.
- [TOR00] TORCH: *Final Report, EC DG-TREN Transport Programme (4.1.1.1/6)*, 2000.
- [TP03] T. PREVOT, V. BATTISTE, E. PALMER S. SHELDEN: *Air traffic concept utilizing 4D trajectories and airborne separation assistance*. AIAA Guidance Navigation and Control Conference, Austin, TX, USA, 2003.
- [TP05] T. PREVOT, V. BATTISTE, T. J. CALLANTINE P. H. KOPARDEKAR P. U. LEE J. S. MERCER E. A. PALMER N. M. SMITH: *Integrated Air/Ground System: Trajectory-Oriented Air Traffic Operations, Data link Communication and Airborne Separation Assistance*. Air Traffic Control Quarterly, 13 No.2, 2005.
- [TU a] TU DARMSTADT, SKRIPTUM ZUR VORLESUNG: *Flugmechanik I*, WS 2007/2008 1. Auflage.
- [TU b] TU DARMSTADT, SKRIPTUM ZUR VORLESUNG: *Flugverkehrsmanagement und Flugsicherung*, WS 2007/2008 1. Auflage.
- [WIR] WIRTSCHAFTSLEXIKON24. <http://www.wirtschaftslexikon24.com>.

Lebenslauf

Name: Alexandra von Eckartsberg
Geboren: 30. September 1974 in Weilburg
Staatsangehörigkeit: deutsch

Berufserfahrung

seit 2008 Senior Consultant, Fraport AG, Frankfurt Airport Services Worldwide
ACI Liaison Officer (Entsant zu EUROCONTROL/Network Manager seit 2014)
Luftseitige Entwicklung (seit 2013)
Luftfahrtforschung (2008-2013)

2002-2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Technische Universität Darmstadt,
Fachgebiet für Flugsysteme und Regelungstechnik

Akademische Ausbildung

1994-2002 Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt
Abschluss: Diplom-Ingenieur
Abschlussarbeit: Konzept und Implementierung eines erweiterten
Pilotenassistenzsystems für das Fehlermanagement im FSRT
Forschungssimulator

1998-2000 Aerospace Engineering, University of Central Florida, USA
Abschluss: Master of Science
Abschlussarbeit: Effect of Small Scale Turbulence on the Evaporation of Single
Suspended Droplets

Schulische Ausbildung

1984-1993 Gymnasium Philippinum Weilburg, Abitur

1980-1984 Grundschule Weilmünster